LIFE02 ENV/IT/000064

RAPPORTO TECNICO FINALE
Relativo alle attività svolte dal 01/11/02 al 31/10/05

Data di Emissione: 31/05/06
PVTRAIN – Tecnologie Innovative per applicazioni fotovoltaiche in ambito ferroviario -

Località:	Roma - Italia
Data di inizio progetto:	01/11/02
Data di fine progetto:	31/10/04; Proroga: 31/10/05
Durata del progetto (mesi):	24 ; Totale con Proroga**:** 36
Costo Totale:	€ 1.252.972
Costo Ammissibile	€ 1.232.222
Contributo EC	€ 616.111
(%) del contributo sulle spese totali	50%
(%)del contributo sulle spese ammissibili	50%
Rapporto Intermedio	29/02/04 ; 31/01/05
Rapporti Tempestivi (se richiesti)	10/06/04 (aggiornamento del RI 29/02/04)
Rapporti semestrali inviati	30/04/03

Beneficiario	TRENITALIA S.P.A.
Indirizzo della sede del beneficiario	Piazza della Croce Rossa, 1 – 00161 - ROMA
Indirizzo/Indirizzi dove si svolge il progetto	Roma – P.zza della Croce Rossa n°1 - 00161 Firenze – V.le Spartaco Lavagnini, 58 – 50100 Firenze – V.le Fratelli Rosselli, 1 - 50123 Verona – V.le staz.ne P.ta Vescovo, 3 - 37100 Foggia – V.le Fortore, 131 - 71100
Persona di Contatto:	Ing. Alessandro Basili– Referente di progetto
Telefono della persona di Contatto	+39-06 4410 6630

Fax della persona di Contatto	+39-06 4410 3208
E-mail della persona di Contatto	a.basili@trenitalia.it
Website del progetto	www.trenitalia.it

INDICE

1. RIQUADRO CON PAROLE CHIAVI ED ABBREVIAZIONI

PAROLE CHIAVE

(Segnare l'area tematica alla quale il Progetto fa riferimento)

Aria	□	**Tecnologie Pulite**	ϒ
Acqua	□	**Buone prassi**	□
Suolo	□	**Tecniche di trattamento a valle**	□
Rumore	□	**Gestione ambientale**	□
Rifiuti	□	**Sviluppo Sostenibile**	□
Risorse Naturali	□		

2. EXECUTIVE SUMMARY

2.1 Gli obiettivi del progetto

Gli obiettivi del progetto sono:

- verifica tecnica di utilizzo di pannelli fotovoltaici di nuova generazione al silicio amorfo in ambito ferroviario per il mantenimento in carica degli accumulatori a bordo rotabile;
- validazione delle tecnologie di recupero energetico tramite pannelli fotovoltaici progettati ed assemblati per materiale rotabile in uso e di nuova generazione (alta capacità/velocità) mediante impianti pilota;
- esportazione dei dati conseguiti e delle risultanze delle prove pilota a beneficio di analoghe strutture europee;
- dimostrazione fattibilità del progetto;
- raccolta dei dati delle misure e delle performance ottenute nella sperimentazione.

2.2 Elenco dei risultati attesi associando all'elenco i deliverables/prodotti

- Riduzione delle emissioni di CO_2 in atmosfera con conseguente diminuzione dell'effetto serra. Deliverables: dati ottenuti dalle prove dei rotabili in esercizio
- Allungamento della durata degli accumulatori con conseguente riduzione dei rifiuti e delle batterie/accumulatori in utilizzo attualmente nel materiale rotabile.
  Deliverables: a seguito delle prove in esercizio dei prototipi, verranno estratti i dati con evidenza di tale risultato atteso;
- Miglioramento della carica degli accumulatori con conseguente miglioramento nella disponibilità per l'esercizio dei veicoli ferroviari.
  Deliverables: descrizione del mantenimento in carica degli accumulatori a seguito dell'applicazione del sistema fotovoltaico
- Definizione della migliore tecnologia di utilizzo di pannelli fotovoltaici per il risparmio energetico in ambito ferroviario.
  Deliverables: Relazione tecnica con valutazione della nuova tecnologia utilizzata;
- Divulgazione delle soluzioni individuate per le tecnologie fotovoltaiche in ambito ferroviario a beneficio di altre società di trasporto merci e passeggeri appartenenti alla UE.
  Deliverables: Individuazione di target group per la divulgazione della nuova tecnologia, costituzione di un gruppo d'interesse, attivazione di un sito internet, organizzazione di una conferenza nazionale ed internazionale; prodotti divulgativi quale: newsletter elettronica

inserita nel sito web di Trenitalia, brochure finale IT/EN, manuale tecnico metodologico, CD-Rom e video con le fasi salienti del progetto e le realizzazioni prototipali sperimentate.

2.3 Sintesi descrittiva del progetto seguendo l'elenco

Il progetto procede intraprendendo le seguenti azioni, evidenziate nella suddivisione del progetto in 6 task:

- analisi di mercato per la scelta dei pannelli idonei alle specifiche esigenze. Verifica industriale di realizzazione di specifici pannelli per treni;
- definizione progettuale dell'intero sistema di alimentazione alternativa di accumulatori per tipologia di rotabile, con particolare riguardo alla installazione dei pannelli, nonché alla progettazione del convertitore;
- studio di fattibilità e definizione specifiche tecniche (effetti aerodinamici) per la realizzazione di coperture di nuove carrozze per alta velocità con pannelli fotovoltaici già reinseriti nella fase di costruzione;
- realizzazione di prototipi su cinque carrozze, tre carri merci e due locomotive (di cui una elettrica ed una diesel), quali mezzi di trasporto rappresentativi del parco rotabile di TRENITALIA;
- divulgazione verso targets pubblici e privati nazionali ed europei tramite uso di internet (sito web), conferenze e materiale divulgativo (brochure, manuale tecnico/metodologico, filmati, articoli).

3. EXECUTIVE SUMMARY (English version)

3.1 Aims of the project

The aims of the project are:

- to technically assess the use of new generation amorphous silicon photovoltaic panels on railways, for keeping accumulators mounted on board rolling stock charged;
- to test the efficiency of the energy recovery technologies by means of photovoltaic panels that are projected and assembled for rolling stock already in use and new generation rolling stock (high capacity/speed) by means of pilot plants;
- to export the data collected and results of the pilot trials for the benefit of similar European organisations;
- to demonstrate the feasibility of the project;
- to collect the data of the measurements and performance obtained during the tests.

3.2 List of the expected results together with the deliverables

- Reduction of CO2 emission into the atmosphere, contributing therefore to the decrease of the greenhouse effect. Deliverables: data obtained from the tests on the rolling stock in use;
- Lengthening of the life of the accumulators with consequent reduction in waste and batteries/accumulators in use at present on rolling stock;
  Deliverables: following the trials of the prototypes, the data will be taken highlighting the expected result;
- Improvement of the battery charged and therefore the efficiency for use on railway vehicles;
  Deliverables: description of improvement of the battery charge following the application of the photovoltaic system

- Assessment of the best photovoltaic panel technology to use for energy saving in the rail context;
  Deliverables: technical report with assessment of the new technology used;
- Communication of the technical solutions reached in the light of the European development of these technologies for the benefit of other goods and passenger transport companies belonging to the EU;
  Deliverables: Identification of target groups for the exchange of new technology, the setting up of an interest group, the organisation of a national and international conference; means of communication such as: an electronic newsletter in the Trenitalia 's web-site, final IT/EN brochure, a technical methodological manual, CD-Roms and videos showing the most important phases of the project and the prototypes under trial.

3.3 Descriptive summary of the project following the list

The following action will be taken:

- market survey for the choice of suitable panels for specific needs. Industrial verification for the production of specific panels for trains;
- project assessment of the whole system of alternative energy supply of accumulators per type of rolling stock, with particular attention to the mounting of the panels, as well as to the design of the converter;
- feasibility study and definition of technical details (aerodynamic effects) for the manufacture of covers for the new high speed coaches with photovoltaic panels already integrated in the construction phase;
- building of prototypes on five coaches, three goods wagons and two electric locomotives, as representative vehicles of Trenitalia's complete rolling stock;
- communication with national public and private targets along with European ones through the use of Internet Newsletter on the web-site of Trenitalia, conferences, audio-visual and/or paper material, publications (manual), final IT/EN brochure, CD-rom showing the presentation of the project.

4. INTRODUZIONE

Il progetto si inserisce positivamente nell'ambito dell'impegno di Trenitalia a favore della compatibilità ambientale dei propri mezzi ed attività; in particolare, l'applicazione di pannelli solari sui treni per la produzione di energia permette di ottenere interessanti risultati di ottimizzazione e risparmio energetico, di riduzione delle emissioni di gas serra e riduzione della quantità dei rifiuti pericolosi da recuperare o da smaltire.

Il PVTRAIN intende, quindi, approfondire, nell'ottica di una società pubblica impegnata nel trasporto passeggeri e merci, il problema dei consumi di energia all'interno del materiale rotabile e contemporaneamente si propone di analizzare e di sviluppare una tecnica innovativa di risparmio energetico mediante l'utilizzo del sistema fotovoltaico sui mezzi in movimento.

Dal punto di vista tecnico il progetto consiste nel garantire l'alimentazione degli accumulatori di emergenza per i servizi di bordo attraverso l'applicazione di pannelli fotovoltaici con tecnologia al silicio amorfo (flessibili e quindi particolarmente adattabili alle superfici curve) sui tetti di 10 mezzi ferroviari: 5 carrozze passeggeri, 1 locomotore elettrico, 1 locomotore diesel e 3 carri merci.

L'energia elettrica fotovoltaica così prodotta garantisce l'alimentazione dei servizi accessori di bordo, come l'illuminazione, l'apertura delle porte e la ventilazione interna.

Ciò determina, oltre alla diminuzione dei consumi energetici complessivi di Trenitalia, una riduzione dell'impatto ambientale per i seguenti motivi:

• *minore produzione di gas serra*: i moduli fotovoltaici mantengono in carica gli accumulatori e gli apparati ausiliari dei treni durante la sosta, senza dover ricorrere alle fonti termiche primarie , con una riduzione di 750 gr di anidride carbonica emessa in atmosfera per ogni kilowatt/h di energia prodotta dagli impianti tradizionali.

• *prolungamento della durata di vita degli accumulatori*: attualmente il sistema tampone di energia elettrica è alimentato dalla linea di contatto in corrente continua che viene captata attraverso il pantografo della locomotiva e distribuita a tutto il treno. Qualsiasi sospensione dell'alimentazione provoca l'azionamento degli accumulatori che vengono così sottoposti a continui cicli di carica/scarica. Con le celle fotovoltaiche, invece, sono tenuti costantemente in carica, con conseguente allungamento del loro ciclo di vita che determina, a sua volta, per il minor consumo di accumulatori, una diminuzione di rifiuti pericolosi (prolungamento teorico di circa il 10-15% del ciclo di vita degli accumulatori, portando il turn over da 48 a 56 mesi).

I risultati ottenuti nei periodi di osservazione per le singole tipologie di mezzi ferroviari utilizzati per la sperimentazione, in termini di energia elettrica prodotta, di anidride carbonica non immessa in atmosfera ed allungamento della vita degli accumulatori, sono evidenziati nella tabella che segue:

Mezzo ferroviario	***Energia elettrica fotovoltaica prodotta (KWh)***	***Periodo di misurazione***	***Anidride Carbonica non immessa in atmosfera (Kg)***	***Prolungamento di vita degli accumulatori (mesi)(*)***
Carrozza	1378,42	Luglio '03 Ottobre '05	1033,82	8
Locomotiva	159,93	Agosto '04 Ottobre '05	119,95	8
Automotrice diesel	540,68	Agosto '04 Ottobre '05	405,51	8
Carro Merci	133,50	Agosto '04 Ottobre '05	100,12	n.d.

(*) I valori riportati in tabella sono stimati e a loro conferma, durante il periodo di osservazione riportato, non si è rilevata alcuna avaria per gli accumulatori installati. Per i carri merci il dato non è disponibile in quanto l'inserimento degli accumulatori è recente (per l'alimentazione delle elettroserrature) e non è disponibile la loro durata di vita storicizzata.

I deliverables del progetto sono sintetizzati nella tabella che segue

Task di riferimento	**Titolo deliverable**	**Tipo**	**Breve descrizione**
Task 1	1.Relazione su indagine di mercato 2.Relazione su indicatori di prestazione 3.Relazione tecnica e modello di analisi	Manuale cartaceo	Tali relazioni hanno consentito di definire lo scenario ambientale in cui si inserisce il progetto, il mercato dei pannelli fotovoltaici disponibili, i KPI per la valutazione prestazionale del progetto; inoltre è stata redatta una relazione dove sono state descritte le scelte tecniche adottate.
Task 2	Realizzazione dei prototipi carrozze 2 carrozza passeggeri 1 carrozza treno verde 2 carrozze bagagliaio	Prototipo di mezzi ferroviari	I prototipi costituiscono la parte realizzativa del progetto che permettere di sperimentare la tecnologia studiata per le tipologie di mezzi scelti
Task 3	Realizzazione dei prototipi carri merci 3 carri merci H 32	Prototipo di mezzi ferroviari	I prototipi costituiscono la parte realizzativa del progetto che permettere di sperimentare la tecnologia studiata per le tipologie di mezzi scelti.
Task 4	Realizzazione dei prototipi locomotori 1 locomotiva elettrica E 636 1 automotrice diesel 668	Prototipo di mezzi ferroviari	I prototipi costituiscono la parte realizzativa del progetto che permettere di sperimentare la tecnologia studiata per le tipologie di mezzi scelti.
Task 5	1. Studio di fattibilità del progetto per un treno Eurostar 2. Stesura di un modello matematico 3. Realizzazione di un modello in scala	Manuali cartacei e modellino in scala	Lo studio della realizzazione di un sistema fotovoltaico per un treno Eurotar con relazione sullo studio degli effetti aerodinamici sul tetto del mezzo e realizzazione di un modello in scala della realizzazione del progetto
Task 6	1. Conferenze divulgative 2. Filmato relativo alla realizzazione dei prototipi 3. Pubblicazione di articoli 4. Realizzazione di un link al sito web di Trenitalia (con Newsletter) 5. Manuale tecnico metodologico per la riproducibilità del progetto 6. Brochure 7. Partecipazione a premi per l'ambiente	Vari	Materiali per la divulgazione del progetto e della tecnologia utilizzata

5. GESTIONE DEL PROGETTO

Il progetto nasce con l'obiettivo di individuare una soluzione alternativa al problema del consumo energetico nel rispetto dell'ambiente utilizzando fonti energetiche rinnovabili ovvero pannelli fotovoltaici.

Il progetto è stato pianificato nell'arco di 24 mesi (più 12 mesi successivi concessi a seguito della richiesta di proroga) e articolato in 6 Tasks nelle quali sono stati individuati i seguenti compiti:

Task 1- Scenario Energetico Ambientale: monitoraggio della situazione esistente in relazione ai consumi energetici e conseguente analisi di emissioni inquinanti nel campo della trazione ferroviaria; analisi del mercato nazionale/europeo dei pannelli fotovoltaici ed individuazione della tecnologia disponibile più idonea per la sperimentazione in ambito ferroviario.

Task 2 - Fotovoltaico per mezzi trainati-carrozze: progettazione, realizzazione e prove su campo di 5 prototipi carrozze attrezzate con il sistema fotovoltaico per l'alimentazione degli accumulatori.

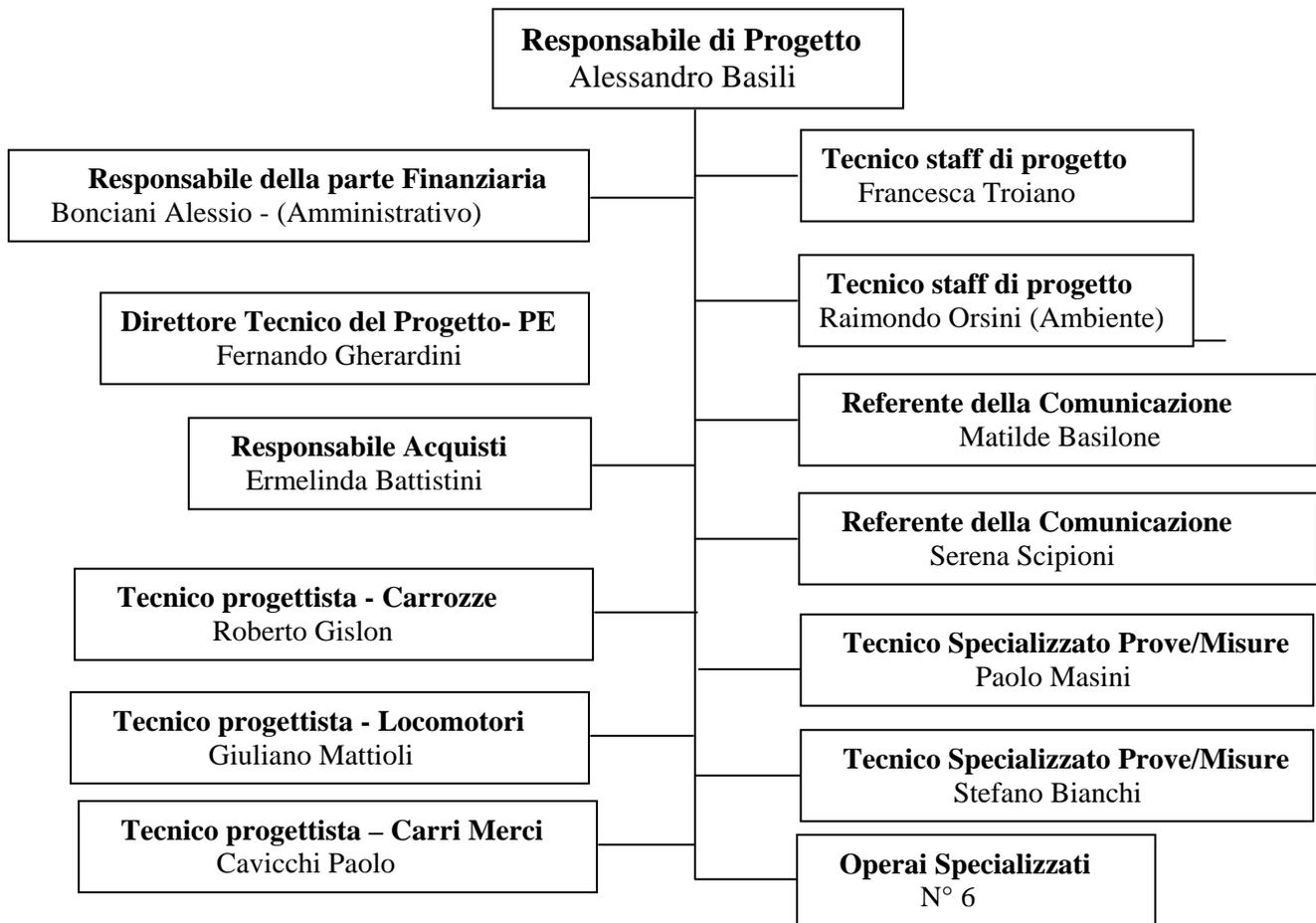
Task 3 - Fotovoltaico per mezzi trainati-carri merci: progettazione, realizzazione e prove su campo di 3 prototipi carri merci attrezzati con il sistema fotovoltaico per l'alimentazione degli accumulatori.

Task 4 - Fotovoltaico per mezzi trainati-locomotori: progettazione, realizzazione e prove su campo di 2 prototipi locomotori attrezzati con il sistema fotovoltaico per l'alimentazione degli accumulatori.

Task 5 - Progetto nuova carrozza Eurostar: studio di fattibilità e definizione di specifiche tecniche per l'applicazione di pannelli fotovoltaici su mezzi ad Alta Velocità e realizzazione di una machete dimostrativa.

Task 6 - Divulgazione e gestione del progetto: divulgazione della tecnologia applicata e dei risultati ottenuti dal progetto mediante conferenze, distribuzione di brochure, sito internet con Newsletter, manuale metodologico, articoli su quotidiani. In questa task è inserita la gestione del progetto con contabilità separata ed una struttura di monitoraggio dell'andamento della spesa di progetto; il sistema informatico di avanzamento contabile e finanziario del progetto utilizza il modulo SAP che dà la possibilità di controllo puntuale delle spese sostenute.

La realizzazione del progetto vede il coinvolgimento di diverse professionalità. Pertanto è stato istituito un gruppo di lavoro con attribuzione delle responsabilità per ciascun membro.

L'organigramma del gruppo di lavoro:

Il beneficiario del progetto PVTRAIN è esclusivamente Trenitalia.

Il Gruppo FS, in seguito al processo di societarizzazione, si compone di una holding alla quale competono gli indirizzi strategici, due società principali che interpretano la logica della separazione tra la gestione delle attività di trasporto - Trenitalia SpA - e quella della rete ferroviaria – RFI SpA- e di numerose altre società.

La missione di Trenitalia, che nasce il 1° giugno del 2000, è quella di assicurare un'offerta in grado di soddisfare, in ambito nazionale ed europeo, le esigenze di mobilità dei viaggiatori, sia di media e lunga percorrenza che di ambito metropolitano, regionale e interregionale nonché di garantire la mobilità delle merci, anche oltre i confini nazionali. Con una flotta di circa 63.000 mezzi è in grado di garantire il trasporto di più di 1.400.000 viaggiatori/giorno e circa 250.000 tonnellate di merci trasportate al giorno.

Nel corso dell'ultima visita di monitoraggio, avvenuta il 15 Settembre 2004, è stata effettuata la richiesta di una proroga al progetto di 12 mesi, mantenendo il budget invariato. Tale richiesta, ufficializzata con la lettera del 17/09/04 (prot. UTMR/IM/0139) ed autorizzata con la lettera del 20/10/04 (prot. ENV.D.1/WC/lm/Adonis/D/513133), è stata effettuata per poter monitorare, in tale periodo, i prototipi realizzati ed ottenere così maggiori garanzie sulla efficienza del sistema fotovoltaico, già verificata con le prime prove e misure, e consolidare ulteriormente gli interessanti risultati ottenuti.

6. TECNICA

Trenitalia ha promosso la sperimentazione di moduli fotovoltaici in silicio amorfo per fornire energia elettrica per la ricarica degli accumulatori a bordo di carrozze viaggiatori, locomotive e carri merci. La sperimentazione ha riguardato l'installazione di pannelli solari, in silicio amorfo a "tegola fotovoltaica", su 5 carrozze, moduli US 116 su 3 carri merci e su una locomotiva elettrica modello E636 e un'automotrice Diesel tipo Aln. Il sistema mantiene in carica gli accumulatori a bordo sia quando i treni sono in movimento che quando sono fermi e non collegati alla rete elettrica a 3kV. Tale tecnologia permette una carica costante degli accumulatori, aumentandone così la durata di vita in quanto non più sottoposti a continui cicli di carica/scarica (conseguenti a distacchi di pantografi dalla linea di contatto), con riduzione del numero degli accumulatori da smaltire: si stima che l'allungamento della vita degli accumulatori sia circa il 10 %-15 % .

6.1 Tecnologie fotovoltaiche

L'effetto fotovoltaico consiste nella trasformazione della luce in energia elettrica, noto fin dal secolo scorso, quando si scoprì che era possibile trasformare direttamente l'energia solare in energia elettrica tramite una cella elettrolitica senza passare per processi termodinamici. Attualmente i moduli fotovoltaici sono costruiti partendo da semiconduttori al silicio, le applicazioni sono essenzialmente per piccole potenze e sopratutto per utenze isolate dove sarebbe oneroso collegarsi con la rete elettrica.

La cella fotovoltaica costituisce il componente base dei sistemi fotovoltaici, un dispositivo costituito da un materiale semiconduttore (wafer) sottile (0,3 mm) di, in genere silicio, opportunamente trattata.

Tale trattamento è caratterizzato da diversi processi chimici, tra i quali i "drogaggi" per i quali, inserendo nella struttura cristallina del silicio delle impurità, cioè atomi di boro e fosforo, si genera un campo elettrico rendendosi così disponibili le cariche necessarie alla formazione della corrente elettrica. L'energia si ottiene, quindi, quando i fotoni della luce solare, colpendo una cella, "strappano" gli elettroni più esterni (di valenza) degli atomi di silicio, che sono poi raccolti dal reticolo metallico serigrafato sulla superficie visibile della cella che "incanala" il flusso di elettroni ottenendo una corrente continua di energia elettrica.

Le principali tecnologie esistenti sono poste a confronto nella seguente tabella:

Tecnologia	Efficienza	Energia prodotta pannello da 1 kWp (20 anni)
Celle a Silicio monocristallino	12-16%	18-24 MWh
Celle a Silicio multicristallino	10-13%	16-20 MWh
Film in silicio amorfo	7-10%	10-18 MWh

Per la sperimentazione sono stati scelti e applicati due modelli diversi di pannelli fotovoltaici ambedue con tecnologia silicio amorfo di produzione entrambi dell'azienda americana Unisolar: le tegole fotovoltaiche SHR-17 (figura 1) per le carrozze viaggiatori e il modulo US 116 (figura 2) per locomotive e carri merci. Entrambe le tipologie di moduli sono a tripla giunzione, cioè con deposizione di tre strati di lega di silicio su un supporto di acciaio flessibile sottile. La cella inferiore assorbe la luce nella banda del rosso, la cella nel mezzo nella banda del giallo e l'ultima assorbe nella banda del blu. La capacità di dividere lo spettro della luce è la chiave dell'alta efficienza di questo tipo di tegola specialmente in condizioni di scarso irraggiamento solare e di luce diffusa. Inoltre il silicio amorfo posto su un sottilissimo supporto di acciaio è molto flessibile e quindi adatto alla superficie del tetto dei vagoni. Per la sperimentazione sulle carrozze è stato scelto

il modulo a “tegola fotovoltaica” (una striscia di 12 tegole fotovoltaiche pre-cablate) con il quale è stato costituito un “vassoio” (figura 3) composto da una matrice di 5 strisce di tegola fotovoltaica collegate in serie tra loro. Su ciascuna carrozza sono stati installati 16 vassoi, cablati in parallelo di otto e in serie di due. Ogni striscia è lunga 2.195 mm e larga 305 mm, con parte attiva di 130 mm. La potenza fotovoltaica sviluppata al metro quadro è di 60 Wp, essendo l’area attiva della singola striscia 13 mm x 2.190mm e la potenza nominale di 17 Wp.

Fig. 1

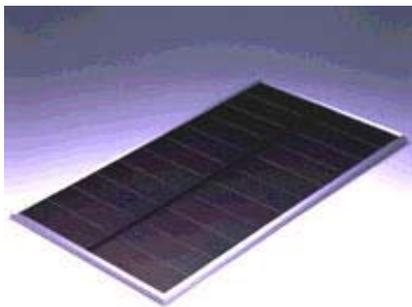



Fig. 2

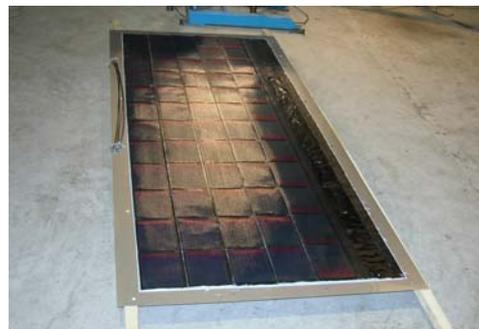



Fig. 3

Il progetto sperimentale PV Train nasce e si sviluppa per verificare la fattibilità, anche in termini di risultati ambientali, dell’alimentazione degli accumulatori a bordo rotabile in assenza dell’alimentazione elettrica a 3 kV. Gli accumulatori portano differenze di capacità a seconda dell’utilizzo e quindi dei rotabili su cui sono posizionati.

Sono di seguito riportate le caratteristiche degli accumulatori, di diversa tipologia, installati sui rotabili interessati dall’applicazione del sistema FV:

- N° 2 bagagliai in tutto e per tutto simili alle carrozza passeggeri: equipaggiati con accumulatori al piombo da 510 Ah.
- N° 1 semipilota (tipo interregionale): equipaggiata con accumulatori al piombo da 510 Ah.
- N°2 carrozze tipo MD: equipaggiate con accumulatori al piombo tipo trazione da 340 Ah.
- N° 1 locomotiva E 636 equipaggiata con accumulatoria al NiCd da 120 Ah.
- N° 1 automotrice(1) a nafta Aln 668 equipaggiata con accumulatoria piombo per avviamento da 280 Ah.
- N° 3 carri merci(2) equipaggiati con n° 2 accumulatori al piombo da 26 Ah (montati per l’alimentazione delle elettroserrature).

(1) le automotrici diesel sono dotate di alimentazione autonoma e pertanto non sono connesse alla linea ad alta tensione di 3 kV.

(2) i carri merci non sono dotati di alcuna alimentazione elettrica.

L’applicazione si suddivide in applicazione meccanica ed elettrica.

6.2 *Applicazione meccanica*

L’applicazione meccanica eseguita per famiglia di rotabili, come successivamente spiegato nel dettaglio, può essere riassunta nella seguente tabella:

Tipologia rotabile	**Rotabile**	**Tipo pannello**	**Potenza di picco installata Wp (W)**	**Energia(**)/ giorno teorica prodotta (rif. Zona Firenze) (Wh/m^2)**
Carrozze bagagliaio Sperimentazione DISQS	61839590100.1 51839590104.5	N° 16 vassoi	1360	3288
Carrozze media distanza	50831178184.5 50838978002.6(*)	N° 16 vassoi	1360	3288
Carrozza semipilota	50832239503.1	N° 16 vassoi	1360	3288
Locomotiva	E 636 385	US 116 - n° 6	696	1682
Automotrice	Aln 668 3231	US 116 - n° 9	1044	2542
Carri Habillss tipo H32	31 83 285 2 616-1 31 83 285 2 440-06 31 83 285 2 340-08	US 116 - n° 3	348	841

(*) la carrozza è utilizzata in composizione al treno verde.
(**) I valori sono stati calcolati supponendo: rendimento dell’impianto FV comprensivo dei moduli e batterie del 75%;. radiazione media per la zona di Firenze pari a 4.03 (fornita da apposite tabelle sperimentali); rendimento del convertitore pari al 80 %.

Mezzi trainati – carrozze

La prima applicazione è stata studiata per le carrozze il cui tetto, denominato imperiale, ha la forma mostrata in figura 4

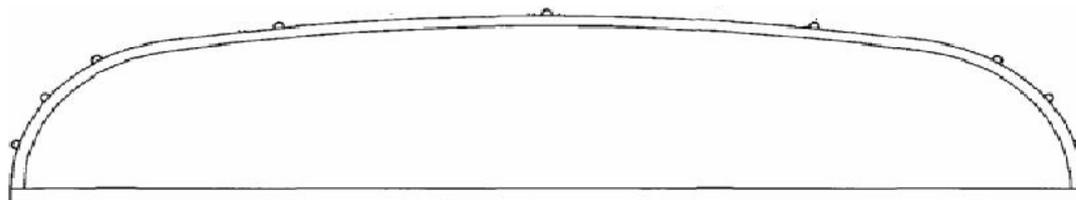



Fig. 4

La sagoma dell’imperiale delle carrozze, obbliga la scelta della forma e delle dimensioni del pannello fotovoltaico che deve essere quindi tale da coprire per quanto possibile la zona centrale, pressoché piana, in modo da facilitarne l’applicazione e nello stesso tempo applicare i pannelli in posizione prossima a quella orizzontale per catturare quanta più energia possibile.

Il pannello fotovoltaico, inoltre, deve essere modulare e facilmente maneggevole per garantire la facilità d’installazione ed, eventualmente, di sostituzione in caso di avaria.

La necessità di ottenere una potenza di picco e una tensione nominale idonea alle necessità applicative, ha determinato la scelta di realizzare matrici di 5 strisce di tegole fotovoltaiche collegate in serie tra loro. Ciascuna di queste matrici è stata applicata su una struttura di lamiera di acciaio inossidabile di dimensioni 2.324 x 1.000 mm e di spessore 1,5 mm in modo da costituire un

“Vassoio”; le strisce di tegole sono state incollate e rivettate al vassoio sovrapponendo le parti non attive (175 mm), ottenendo così 650 mm di zona attiva e 350 mm di zona non attiva che, ripartita alle due estremità del vassoio, verrà utilizzata per il fissaggio del vassoio stesso all’imperiale della carrozza.

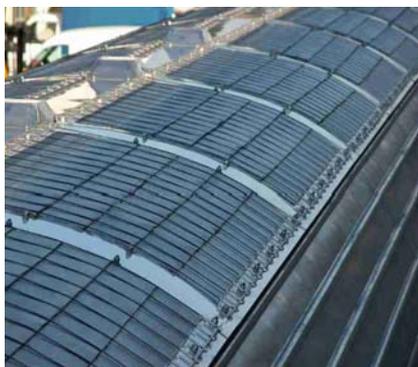
Sull’imperiale delle carrozze saranno applicati n° 16 vassoi che saranno fissati su profili preventivamente saldati sul tetto delle carrozze stesse. I vassoi sono curvati con lo stesso raggio di curvatura della parte centrale dell’imperiale (2,5 m per tutte le tipologie di carrozze scelte).

Ogni vassoio viene fissato sull’imperiale mediante bulloni sui due profili saldati posizionati in corrispondenza dei fori presenti sul vassoio.

Al fine di garantire il fissaggio delle tegole anche in condizioni di alta velocità e di condizioni d’esercizio sfavorevoli (ingresso in galleria, incrocio con altri treni, ecc.) si è previsto di affiancare alla tenuta tramite incollaggio anche un fissaggio di tipo meccanico, ovvero tiranti fissati all’estremità del vassoio. Il corretto fissaggio della struttura è un elemento determinante per l’esito della sperimentazione, in considerazione della evidente pericolosità della perdita di particolari delle carrozze in linea che possono arrecare danni alle persone ed alle cose.

La criticità dell’applicazione è determinata dai seguenti fissaggi: fissaggio adesivo, tramite rivetti tra le fasce di tegole e lamiera di sostegno nonché tramite dei tiranti; fissaggio meccanico tra la lamiera stessa e l’imperiale della carrozza.

Le carrozze per le quali è consentita la velocità massima sono le carrozze bagagliaio assegnate alla Sperimentazione di Trenitalia; tale velocità è di 200 km/h. I parametri per i quali viene calcolata la sollecitazione massima a cui viene sottoposto il pannello sono velocità massima di 200 Km e vento laterale di 150 km/h. Il risultato è una velocità totale di 250 Km/h (69,4 m/s). Il vassoio una volta montato sull'imperiale può essere assimilato ad una lastra piana avente un coefficiente di portanza pari a 0,8, larghezza di 980 mm e lunghezza di 2500 mm per una superficie portante di 2,45 m^2. Il risultato è che il vassoio è sottoposto ad uno sforzo massimo di 588 N.

Dettagli dell’applicazione dei vassoi sul tetto delle carrozze

Mezzi trainati – carri merci

Per tale applicazione sono stati individuati pannelli pre-costituiti tipo US 116, al silicio amorfo e con minima flessibilità (anche se, per tale applicazione, non è una caratteristica indispensabile), con la potenza di picco di targa 116 Wp. L'applicazione sui carri merci, infatti, avviene su una superficie praticamente piana e quindi non esistono problemi di curabilità dei pannelli. Si è quindi voluto utilizzare una diversa tipologia di pannelli in modo da poter confrontare la resa energetica dei due tipi e poter definire il pannello con migliori prestazioni per l' applicazione in ambito ferroviario.

Sul tetto di ogni carro sono stati installati n° 3 pannelli della potenza complessiva di picco W p = 348 W.

L'applicazione dei moduli ha comportato le seguenti operazioni preliminari:

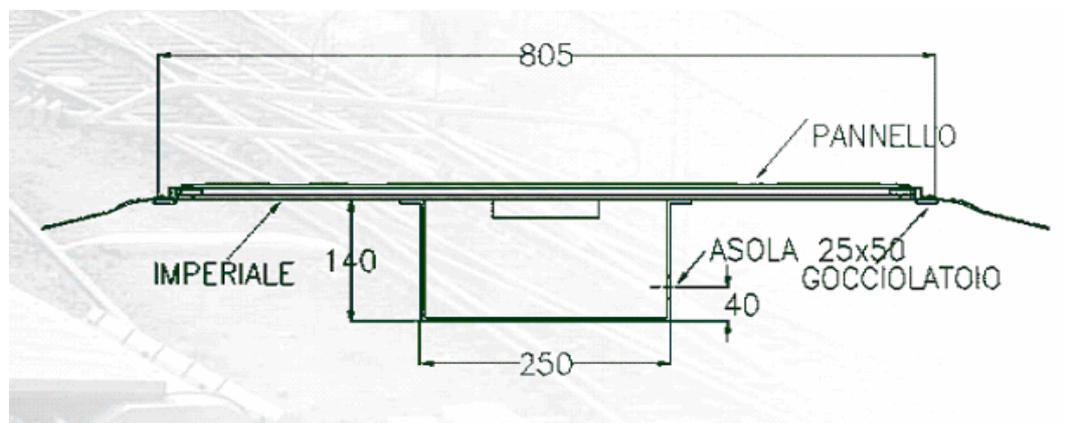
- per ciascun modulo US 116 è stato ridotto lo spessore della sua cornice in alluminio fino a raggiungere 9 mm, in modo da rispettare le dimensioni d'ingombro dettate dalla sagoma limite;
- sull'imperiale, per ogni pannello FV da applicare, è stato realizzato un foro di dimensioni 130 x 200 mm in modo da consentire l'alloggiamento della scatola esistente nella parte inferiore del pannello ed il corretto passaggio dei cavi ad essa collegati. La posizione dei fori è legata alla posizione dei moduli sull'imperiale del carro;
- per la fuoriuscita dei cavi dei moduli, in corrispondenza ad ogni pannello è stata praticata sul lato verticale della Omega un'asola di dimensioni 50 X 25 mm.

Il modulo FV è bloccato all'imperiale da un telaio realizzato con profili a Z di acciaio inox. Il fissaggio del telaio è effettuato per mezzo di rivetti stagni in acciaio inox del diametro di mm 4,8, disposti ad una distanza massima di 240 mm l'uno dall'altro.

La foratura dell'imperiale è effettuata utilizzando il telaio stesso come maschera ed interessa la sola zona sovrastante il gocciolatoio ove la lamiera dell'imperiale è rinforzata da altra lamiera di spessore 4 mm.

La lamiera dell'imperiale è protetta contro l'ossidazione da un trattamento di verniciatura con l'uso di prodotti sintetici e successiva spalmatura di uno strato protettivo di materiale plastico dello spessore di almeno 2 mm

La posa in opera di ogni pannello FV avviene avendo cura di interporre un film di polietilene fra lo stesso ed il materiale plastico spalmato sull'imperiale.

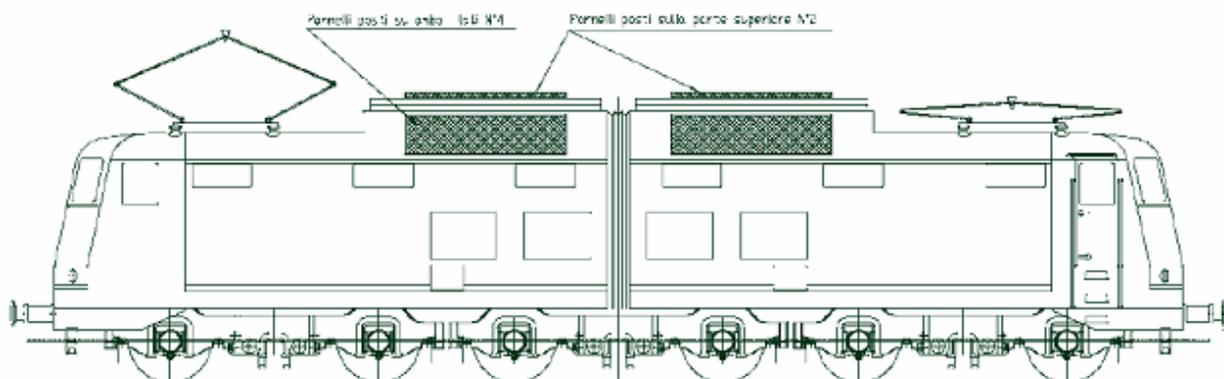
Viene inoltre disposta, sotto la cornice del pannello, una guarnizione continua di gomma mousse a cellule chiuse, dello spessore di mm 5, per regolarizzare il contatto fra la cornice e la lamiera dell'imperiale. La tenuta fra il telaio e la cornice del pannello e fra il telaio e la superficie dell'imperiale è realizzata con l'applicazione di silicone sigillante.

Applicazione dei moduli fotovoltaici sui prototipi carri merci

Mezzi trainanti – locomotori

Sul ***Locomotore E636*** sono stati installati 6 moduli UNI-Solar US 116 di dimensioni 766,2 x 2437,3 mm disposti nel seguente modo:

- n.2 moduli sul lato corridoio di cui 2 disposti sull'imperiale con inclinazione di 30° ed il terzo lateralmente in prossimità di un finestrino;
- n.2 moduli sull'imperiale della carrozza tilt 0°;
- n.2 moduli disposti nello stesso modo sull'altro lato della locomotiva.

Le caratteristiche elettriche dei moduli individuati, tenendo conto dei collegamenti serie/parallelo, sono riportate nella seguente tabella:

Tipo pannello	**N° moduli in serie parallelo**	**Potenza nominale (Wp)**	**Tensione alla max potenza (V)**	**Tensione max a circuito aperto a – 10° (V)**	**Tensione min di lavoro (V)**	**Corrente generata max (A)**	**Range di tensione operativo (-20 ÷ 60 °C)**
US-116	2 x 3	696	90	148	7,8	9,6	55 ÷165

Per calcolare lo sforzo aerodinamico del pannello si sono assunte le seguenti condizioni:

- Velocità massima del treno = 120 km/h
- Velocità massima del vento laterale = 150 km/h

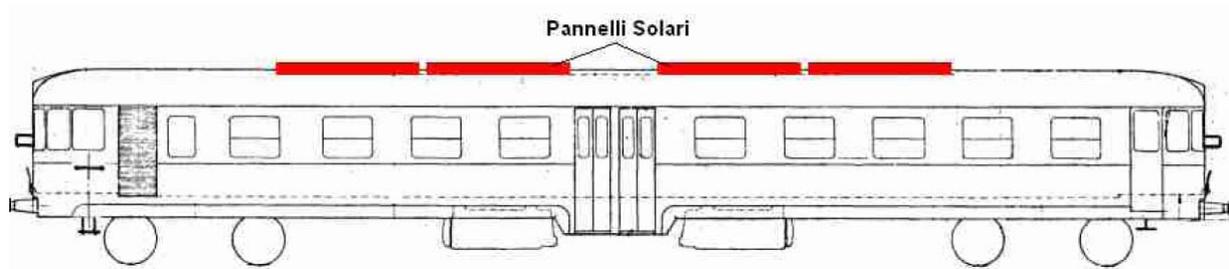
Il pannello US 116 una volta montato sull'imperiale si può assimilare ad una lastra piana avente un coefficiente di portanza pari a 0,8, larghezza di 80 mm e lunghezza di 2500 mm per una superficie portante di 2 m^2. Lo sforzo risulta di 355 kgforza (3483 N).

Di conseguenza sulle viti di bloccaggio del vassoio risulta applicata una forza di trazione massima di 355 Kg, ipotizzando una distribuzione omogenea della pressione.

Applicazione dei moduli US 116 sul prototipo Locomotore E 636

Sull'***Automotrice Aln 668*** sono stati installati nove moduli US116 collegati in serie (tre a tre formando 3 file di serie ciascuna) e, quindi in parallelo.

Le caratteristiche elettriche del sistema fotovoltaico tenendo conto dei collegamenti serie/parallelo, sono riportate nella seguente tabella:

Tipo pannello	**N° moduli in serie parallelo**	**Potenza nominale (Wp)**	**Tensione alla max potenza (V)**	**Tensione max a circuito aperto (V)**	**Tensione min di lavoro (V)**	**Corrente generata max (A)**	**Range di tensione operativo (-20 ÷ 60 °C)**
US-116	3 x 3	1044	90	148	66	14.4	55 ÷165

Per calcolare lo sforzo aerodinamico del pannello si sono assunte le seguenti condizioni:

- Velocità massima del treno = 140 km/h
- Velocità massima del vento laterale = 150 km/h

Il pannello US 116 una volta montato sull'imperiale si può assimilare ad una lastra piana avente un coefficiente di portanza pari a 0,8, larghezza di 80 mm e lunghezza di 2500 mm per una superficie portante di 2 m^2.
Lo sforzo calcolato risulta di 325 kgforza (3188 N). Di conseguenza sulle viti di bloccaggio del vassoio risulta applicata una forza di trazione massima di 355 Kg, ipotizzando una distribuzione omogenea della pressione.

Applicazione dei moduli US 116 sul prototipo Automotrice Aln 668

6.3 Applicazione elettrica

L'applicazione elettrica comporta lo studio di interfacciamento tra i circuiti esistenti a bordo rotabile e i pannelli FV che generano energia elettrica con tensione continua compresa nel campo di variazione di 60 ÷ 140 Vcc .
Lo schema di principio ideato è rappresentato nella seguente figura:

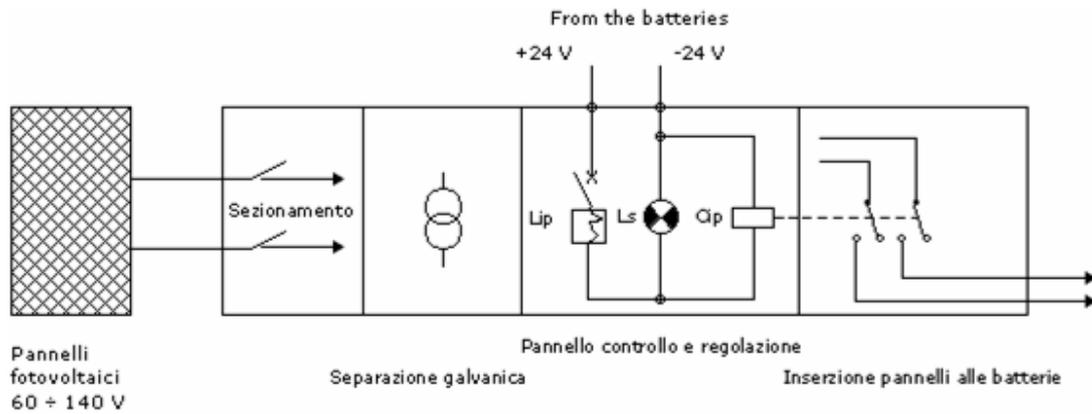



Fig. 5

L’energia elettrica a media tensione (60 ÷ 140 V) generata dai pannelli fotovoltaici è trasformata, tramite apposito convertitore, in energia elettrica con tensione e corrente idonea alla ricarica delle batterie del rotabile (circa 29 V). Tale convertitore, tra l’altro, garantisce l’isolamento galvanico dalla linea di alimentazione (3kV in corrente continua) in caso di contatti accidentali vari (rottura del filo sagomato della linea aerea a 3kV e conseguente caduta del cavo sui pannelli). La tensione d’isolamento minima è di 9500 V.

Questi trasforma l’energia prodotta dai pannelli seguendo le condizioni estremamente variabili prodotte dal movimento del mezzo come variazione della potenza generata dovuta alla variazione della luce incidente: basti pensare al rotabile in movimento che passa velocemente da zone di ombra a zone di piena illuminazione solare.

Mezzi trainati - carrozze

L’applicazione elettrica consiste:

- cablaggio dei cavi di collegamento fra i vari vassoi e il convertitore, l’applicazione del convertitore sottocassa del rotabile (carrozza) e collegamenti fra i vari componenti (vassoi) mediante opportune scatole di derivazione;
- sezionamento della linea di alimentazione del convertitore tramite fusibile nel caso di eventuali avarie dei pannelli FV;
- sezionamento tramite interruttore della linea di collegamento fra convertitore e batterie.

Il collegamento serie tra le strisce di tegole fotovoltaiche e i collegamenti serie/parallelo dei 16 vassoi installati sul tetto delle carrozze, è mostrato nella fig. 6: i vassoi sono collegati in serie due a due e poi un parallelo.

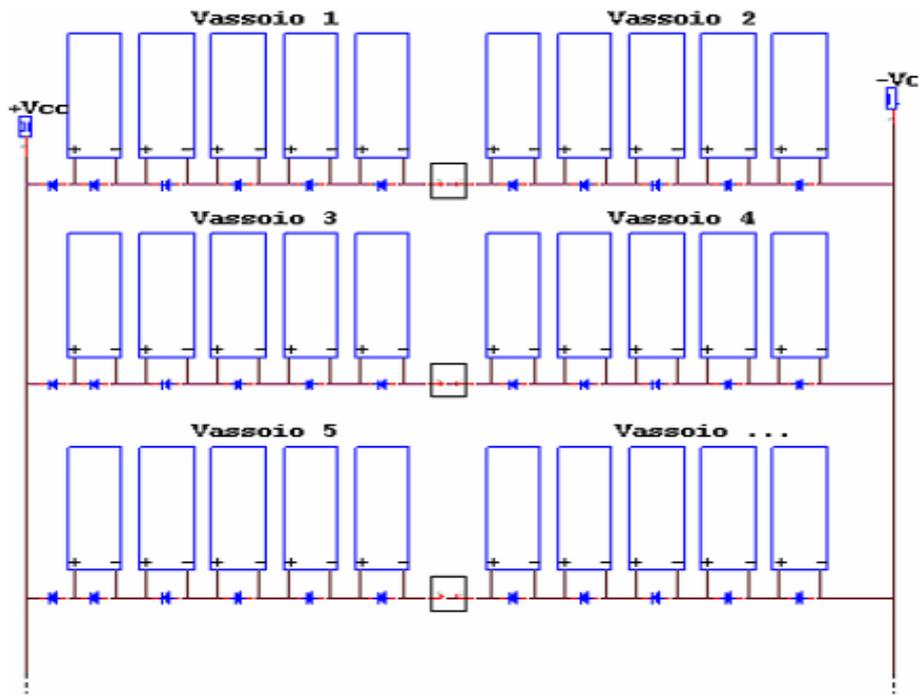
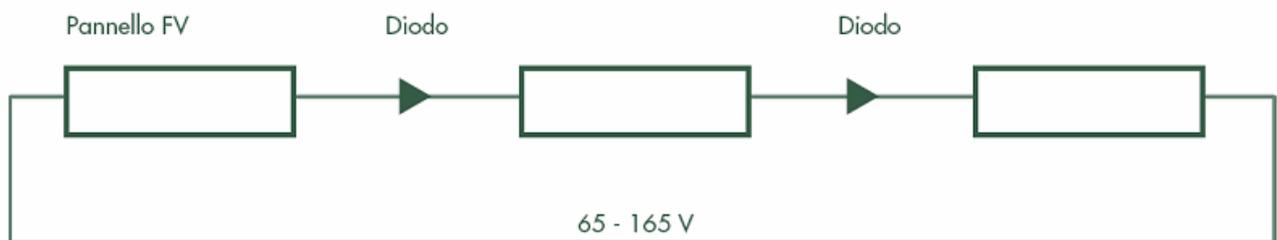
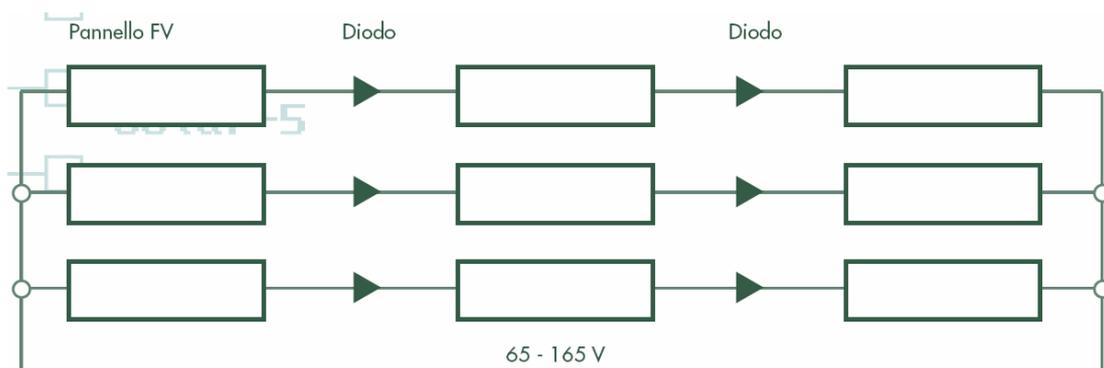
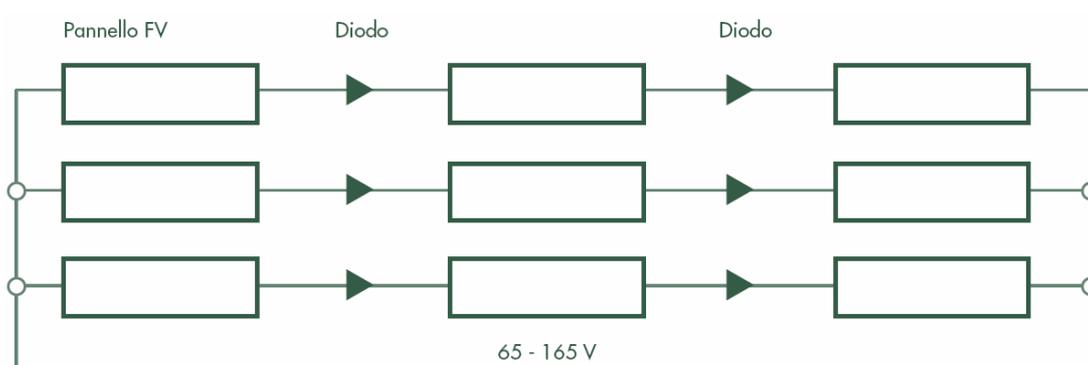



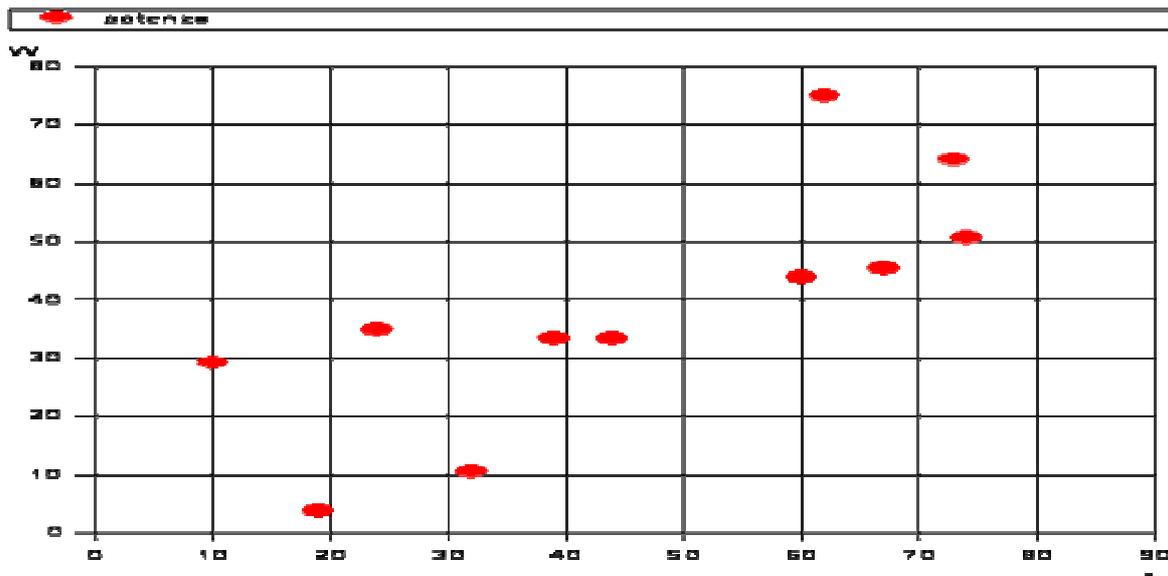
Fig. 6 – Collegamenti elettrici dei vassoi sul tetto delle carrozze

Mezzi trainati – carri merci

I collegamenti elettrici dei moduli fotovoltaici prevedono 3 moduli in serie, come mostrato nello schema seguente.

Mezzi trainanti – locomotori

I collegamenti elettrici dei moduli fotovoltaici del ***Locomotore E 636*** prevedono 6 moduli totali disposti su due file di 3 moduli fotovoltaici in serie ciascuna collegate in parallelo tra loro come mostrato nello schema che segue.

I collegamenti elettrici dei moduli fotovoltaici dell'***Automotrice Aln 668*** prevedono 9 moduli totali disposti su tre file di 3 moduli fotovoltaici in serie ciascuna collegate in parallelo tra loro come mostrato nello schema che segue.

6.4 Verifica della progettazione

Allo scopo di verificare gli studi teorici ed i calcoli sviluppati sono state eseguite le seguenti verifiche:

- caratterizzazione vassoio, relativa al grado di efficienza fotovoltaica ed eseguita dalla Struttura Sperimentazione di UTMR presso l'Officina di Porta a Prato (Firenze) in una giornata con tempo variabile, ha fornito i risultati, in termini di potenza generata in funzione dell'inclinazione del pannelli espressa in gradi, riportati nella tabella che segue.

- Prova di sollecitazione aerodinamica in galleria al vento di un vassoio, allo scopo di valutarne gli effetti aerodinamici, eseguita il 28 marzo 2003 presso il Dipartimento di Ingegneria di Perugia. Il vassoio è stato montato in posizione orizzontale, del tutto simile all'installazione sui rotabili, ed investito dall'aria alla velocità di 170 km/h. I risultati di queste prime analisi sono diagrammati di seguito (in Pascal), con numerazione crescente dal bordo d'attacco verso la zona posteriore.

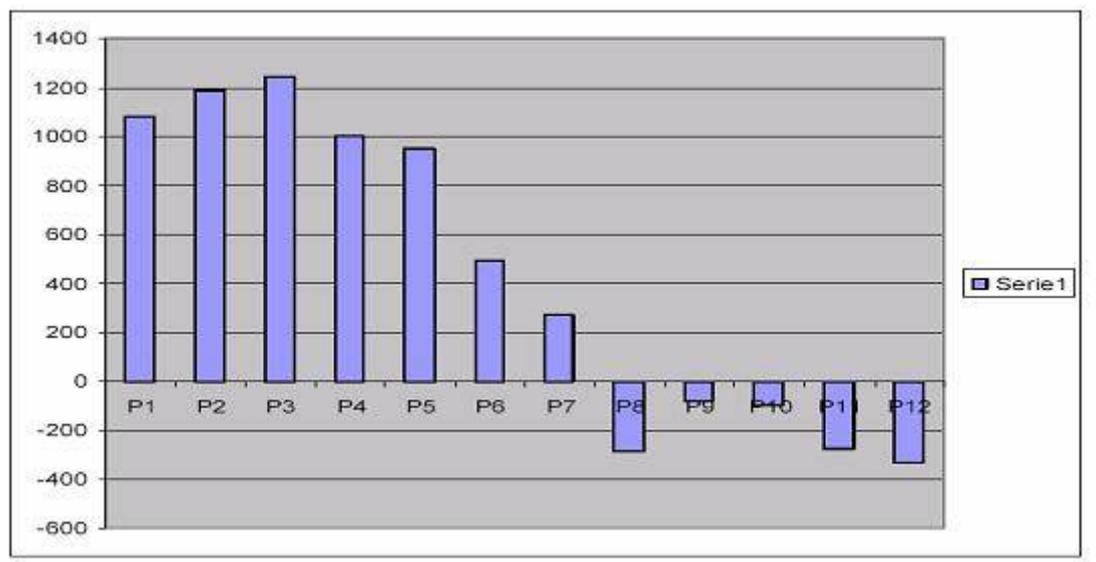



Fig. 7 – Andamento grafico delle pressioni sperimentali sul vassoio.

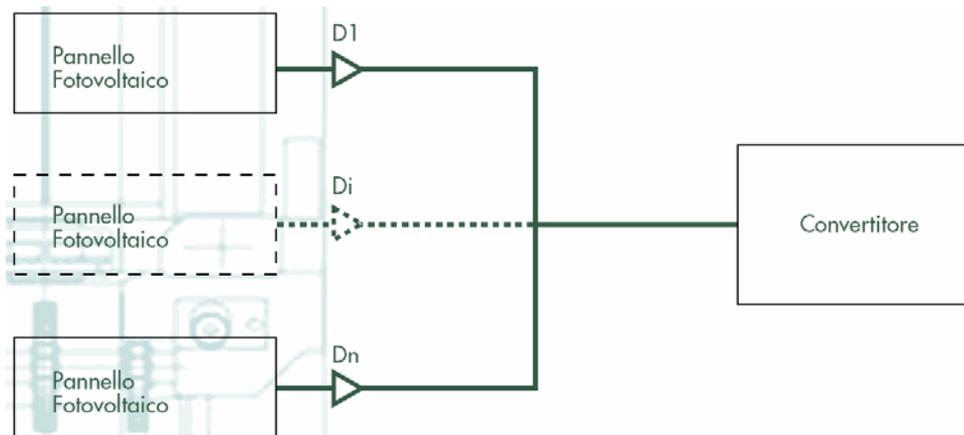
Dall'analisi del diagramma delle pressioni (fig. 7) viene confermata la valenza del calcolo teorico, indicando che la parte anteriore del pannello è sottoposta alla quasi totalità dello sforzo dinamico.

Per la prima fase della sperimentazione di PVTRAIN è stata scelta una carrozza-misura e non una comune vettura passeggeri, perché su di essa si può esercitare un maggiore controllo sul sistema fotovoltaico e di misura; inoltre, questo tipo di carrozza svolge un intenso servizio commerciale, ciò che determina le condizioni ideali per poter apprezzare in pieno i benefici della tecnologia fotovoltaica per il mantenimento in efficienza delle batterie degli accumulatori. Infine, anche l'impiego misto, per velocità e linee di prova a cui è destinata la carrozza misure, consente di avere un quadro più preciso circa i limiti e le potenzialità del progetto PVTRAIN.

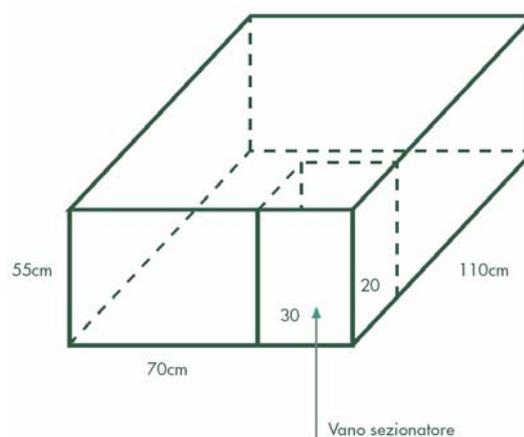
6.5 Il convertitore

Questi è il dispositivo elettronico d’interfacciamento fra i pannello FV e gli esistenti circuiti del rotabile.

Di seguito è riportato un sunto delle caratteristiche tecniche dello stesso. Installato nel sottocassa dei rotabili FS, è destinato alla ricarica delle batterie ed all'alimentazione delle utenze a bassa tensione (24 Vcc) installate a bordo degli stessi.

I convertitori sono destinati all’alimentazione delle batterie dei veicoli per il servizio nazionale e devono funzionare con alimentazione di pannelli fotovoltaici. I pannelli sono costituiti da moduli collegati in serie. Viene realizzato il parallelo di ciascuna serie con diodi di interblocco. Nella seguente figura viene riportato schematicamente il collegamento:

La tensione di alimentazione è compresa nei seguenti range:

- 60÷140 Vcc utilizzando come pannelli FV la tegola fotovoltaica (carrozze).
  La tensione di riferimento o di generazione max potenza è 86 Vcc.
  La corrente generata nel punto di massima potenza è I= 16 A
- 55÷165 Vcc utilizzando i pannelli US 116 (carri e locomotive).
  La tensione di riferimento o di generazione max potenza è 90 Vcc.
  La corrente generata nel punto di massima potenza è I= 16 A

Il convertitore deve essere contenuto in un'unica cassa idonea all'applicazione sotto al telaio dei rotabili FS con le seguenti dimensioni.

Le caratteristiche del convertitore:

Potenza nominale

La potenza nominale, espressa in kW, è di 1,3 kW.

Rendimento e perdite

Il rendimento dei convertitori / caricabatterie alle tensioni di alimentazione nominali e carico nominale deve essere superiore a 0,85.

Rigidità dielettrica

Deve essere previsto l'isolamento galvanico fra i circuiti lato celle FV e BT e fra gli stessi e la massa. La rigidità dielettrica tra le aree galvaniche deve essere dimensionata per la tenuta alle tensioni di prova di seguito elencate:

- Circuiti lato celle fotovoltaiche rispetto ai circuiti BT e la massa > 9500 Volt rms.
- Circuiti BT rispetto alla massa > 500 Volt rms.

La *resistenza d'isolamento* fra le aree galvaniche sopra descritte e fra le stesse e la massa deve essere > di 10 Mohm.

Fusibile di protezione

I convertitori devono essere protetti sulla linea di alimentazione mediante un opportuno fusibile. Esso sarà ubicato all'esterno del regolatore ed il suo intervento deve essere limitato alle sole avarie intrinseche non protette dalle protezioni attive del carica batterie.

L'uscita di bassa tensione deve avere due morsetti contrassegnati nel seguente modo:

(-B) Per il collegamento al polo negativo della batteria.

(+) Comune, per il collegamento al polo positivo della batteria

Il carico del convertitore deve essere la batteria che è caricata, a corrente costante, da tensione zero (batteria completamente scarica) fino alla tensione di mantenimento.

L'ondulazione della corrente fornita alla batteria non deve superare in qualunque condizione di funzionamento il valore sotto richiamato. Indipendentemente dallo stato della batteria, la variazione di carico all'uscita "- L" (I tot - I batt.) non deve influire sulla caratteristica (VI) di ricarica.

La disinserzione o l'inserzione, anche contemporanea, della totalità del suddetto carico non deve provocare una variazione transitoria superiore a 36 V o inferiore a 18 V.

L'isolamento galvanico dell'uscita rispetto al circuito di alimentazione deve essere realizzato mediante un opportuno trasformatore.

La batteria del rotabile è costituita da elementi al piombo di capacità 510 Ah, con tensione nominale di 24 Vcc.

Potenza nominale	1,3 kW
Tensione nominale	24 Vcc
Caratteristica di uscita VI (V costante / I costante)	quadrata
Tensione di fine carica in funzione della temperatura ambiente	28,8V - 0,03V* (Tamb - 20°C) +0/-0,4 Vcc
Caratteristica di uscita VI (V costante / I costante)	-10 ÷ 50 C°
Tensione di fine carica in funzione della temperatura ambiente (tensione di mantenimento)	45 A ± 5 %
Ripple di tensione a potenza nominale con carico resistivo ed in assenza di batteria	≤ 0,4 Vpp
Ripple di corrente morsetto "- B" (picco-picco) per ramo	≤ 5 App
Resistenza d'isolamento (misurata a 500 Vcc)	≤ 10 MΩ
Tensione di prova dell'isolamento elettrico dei circuiti BT (50 Hz sinusoidali per 60 sec)	500 Veff

<u>La messa a punto del convertitore</u>

La messa a punto del convertitore, che costituisce l'interfaccia elettrica fra i pannelli FV e il circuito elettrico della carrozza (batterie), è stata necessaria in quanto i risultati delle prime prove mostravano una ridotta produzione di energia elettrica dai pannelli fotovoltaici. Tale taratura è stata effettuata con la carrozza ferma, in una giornata di sole del mese di luglio 2003; il test ha verificato l'erogazione di energia alla batteria, come mostra la curva riportata nella seguente figura 8.

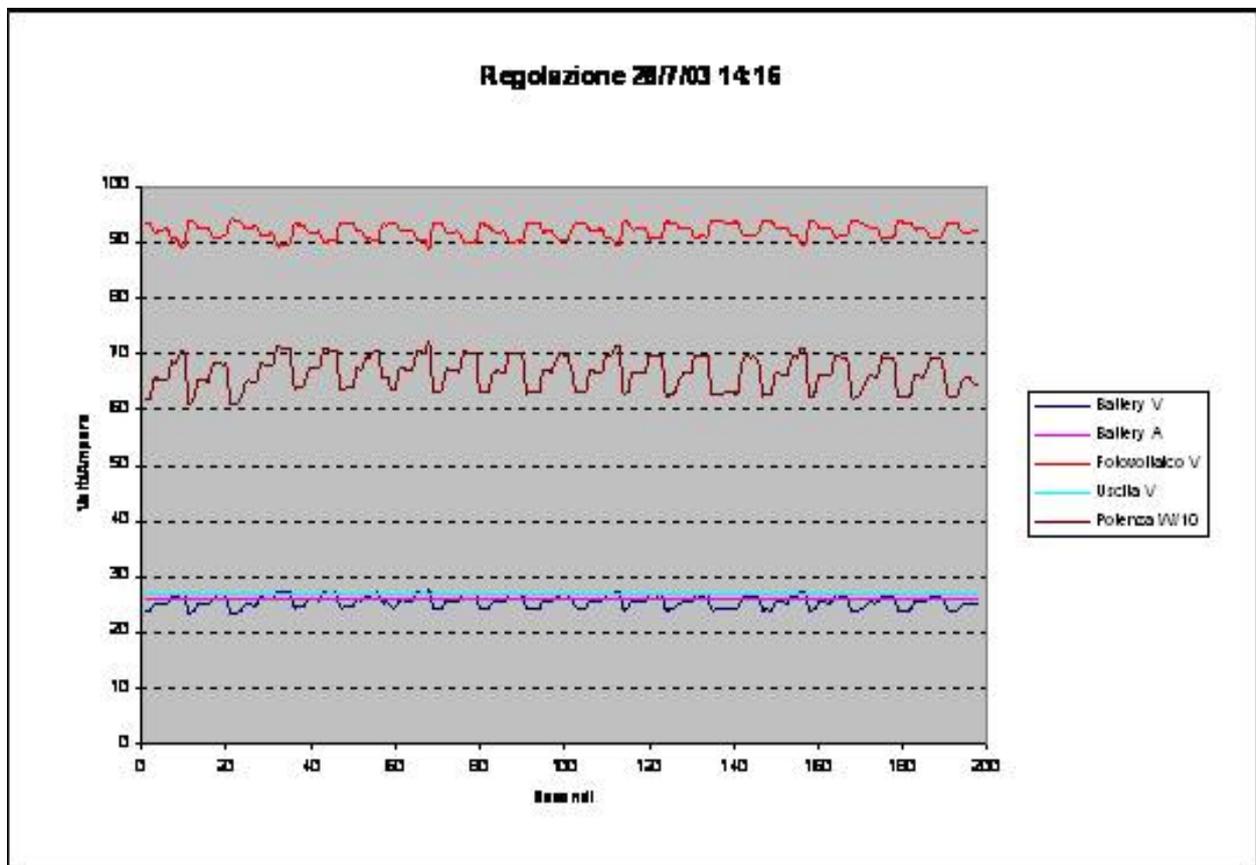



Fig. 8 – Grafico di messa a punto del convertitore FV.

La curva rossa rappresenta la tensione del campo fotovoltaico, la curva marrone la potenza estratta in watt.

L'aggancio alla massima potenza avviene incrementando di 50 mV la tensione di uscita, dal convertitore, ogni 4 sec. e verificando che la tensione del campo fotovoltaico non cali più di 1 Volt.

Il rendimento del convertitore risulta superiore a 0.82, attestando che in una giornata favorevole i pannelli fotovoltaici possono erogare circa 700 W/0.82 = 853 Watt di potenza massima..

Queste prove pratiche sono state realizzate in una giornata di sole, ad una temperatura misurata, sulla superficie dei pannelli, di 63.5 °C.

6.6 Sistemi di misurazione utilizzati

Allo scopo di tenere sotto controllo la sperimentazione, sono stati individuati i seguenti indicatori:

1. Adesione dei pannelli sull'imperiale (tetto del rotabile o fiancata delle locomotive);
2. Degrado prestazionale del pannello;

3. Influenza dell’inquinamento ambientale;
4. Influenza dell’interferenze elettromagnetiche;
5. Influenza del rumore aerodinamico dovuto all’inserzione dei pannelli.

Il primo indicatore individuato, valido per tutti i prototipi realizzati, è l*’adesione dei pannelli sull’imperiale dei rotabili*, che è così determinato:

Indicatore	Obiettivo	Tipo controllo	Frequenza misurazioni
$I_{ap} = \frac{\text{n° distacchi}}{\text{n° carrozze}}$	Zero distacchi	Ispezione Visiva	3 mesi

Altro parametro è il *degrado prestazionale* del pannello che può essere raggruppato in cinque categorie:

- degradazione di materiali dovuto all'impacchettamento: quando i materiali sono danneggiati o si degradano durante il normale servizio;
- perdita di adesione del pannello: definita come il guasto delle obbligazioni tra strati del materiale che costituiscono un modulo;
- degradazione di cella o delle interconnessioni dei moduli: le sollecitazioni termo - meccaniche dovute al ciclismo quotidiano provocano la degradazione degli strati di film sottile nei luoghi della saldatore-giuntura;
- degradazione causata da intrusione di particelle di liquido: può essere collegata anche a perdita di forza adesionale all’interno del modulo;
- degradazione del dispositivo a semiconduttore: la corrosione elettrochimica dell'ossido trasparente conduttivo consente la migrazione del sodio, la presenza di interna di particelle d’acqua appare accelerare inizio e proseguimento della corrosione.

L’influenza dell’inquinamento ambientale nasce dalla considerazione che la corrente generata dalle celle solari dipende dalla distribuzione spettrale della luce solare. Tale distribuzione spettrale è influenzata da un numero elevato di variabili che includono la massa dell’aria, la presenza delle nuvole, pioggia, nebbia, polvere, fumo, ecc.
L'impatto dello sporco sulla produzione dell’energia elettrica dai pannelli FV, è un problema frequentemente menzionato e molto spesso incompreso.

Indicatore	Obiettivo	Tipo controllo	Frequenza misurazioni
$\Delta Wp\% = \frac{W_{pn} - W_{old}}{W_{pn}}$	$\Delta Wp\% = 0$	Misura potenza di picco	Ogni 3 mesi

Dove:

ΔWp% è la variazione percentuale della potenza di picco generata dai pannelli FV installati su una carrozza.
W_{pn} è la potenza di picco generata dai pannelli FV nuovi, ovvero appena installati.
W_{old} è la potenza di picco generata dai pannelli FV con l’invecchiamento subito nelle condizioni di esercizio.

La situazione più pericolosa studiata riguardo alle <u>*interferenze elettromagnetiche*</u> sui sistemi FV sono gli effetti derivanti dal fulmine durante temporali.

La variazione di intensità del campo elettrico al di sopra del generatore FV, risulta in sovratensione se la fulminazione di origine atmosferica interessa l'installazione o le sue aree circostanti.

Ulteriori condizioni di accoppiamento induttivo esistono nel caso di applicazione sopra il tetto della carrozza o della locomotiva dovuto alle variazioni di corrente assorbite dall'azionamento della locomotiva: le correnti in gioco sono estremamente variabili (da circa 500 ÷ 1500 A).

Infatti durante il normale il funzionamento si verificano continuamente distacchi del pantografo dalla linea a 3kV. Questi distacchi possono essere del tipo:

- Breve: inferiori al msec
- Lunghi: dell'ordine di 100 msec

Nel primo caso non abbiamo alcuna variazione della corrente, ma si verifica produzione di un arco elettrico di breve intensità che non dovrebbe avere alcuna influenza sul sistema FV.

Mentre il secondo caso provoca archi di intensità maggiori con possibili variazioni istantanee della corrente e conseguente produzione di un campo elettromagnetico con condizioni simili, per certi aspetti, all'azione del fulmine.

Al fine di valutare gli effetti sul FV, sono previste delle misurazioni mediante il sistema di acquisizione dati per valutare gli effetti prodotti dall'arco durante:

- normale captazione dell'energia dalla linea di contatto;
- intervento delle protezioni della locomotiva (apertura extrarapida dell'interruttore di protezione);
- distacco del pantografo per tempi lunghi.

Si misura <u>*l'influenza del rumore aerodinamico*</u>: infatti l'inserimento dei pannelli modifica la morfologia della superficie dell'imperiale o della fiancata della locomotiva., pertanto il rumore aerodinamico si modifica. Definiamo:

- $\mathbf{R_{ap}}$ è il rumore della carrozza con i pannelli FV, misurato all'interno
- $\mathbf{R_a}$ è il rumore della carrozza senza i pannelli

Indicatore	Obiettivo	Tipo controllo	Frequenza misurazioni
$\Delta R_a = \dfrac{R_{ap} - R_a}{R_{ap}}$	$\Delta RI_a \leq 3\%$	Misurazione rumore	Solo per la carrozza bagagliaio

I sistemi utilizzati per le misurazioni elettriche sono di due tipi:

- sistema *field point* che permette di registrare i dati in modo continuo per più di venti giorni consecutivi, evitando la necessità di presenza costante di personale; terminato il tempo massimo di registrazione dati, sarà necessario scaricarli su un PC portatile;
- sistema di misura *real time* che permette di visualizzare in tempo reale sul computer mediante il collegamento ad una pagina web, i valori di tensione generata dal pannello fotovoltaico, della tensione di carica batterie e della corrente di ricarica.

Il sistema *field - point* è stato utilizzato, per la campagna di misure, sulla carrozza bagagliaio assegnata alla Sperimentazione della Direzione Ingegneria Sicurezza e Qualità di Sistema di Trenitalia. La campagna di misurazioni è iniziata nel luglio 2003 ed è terminata ad ottobre 2005.

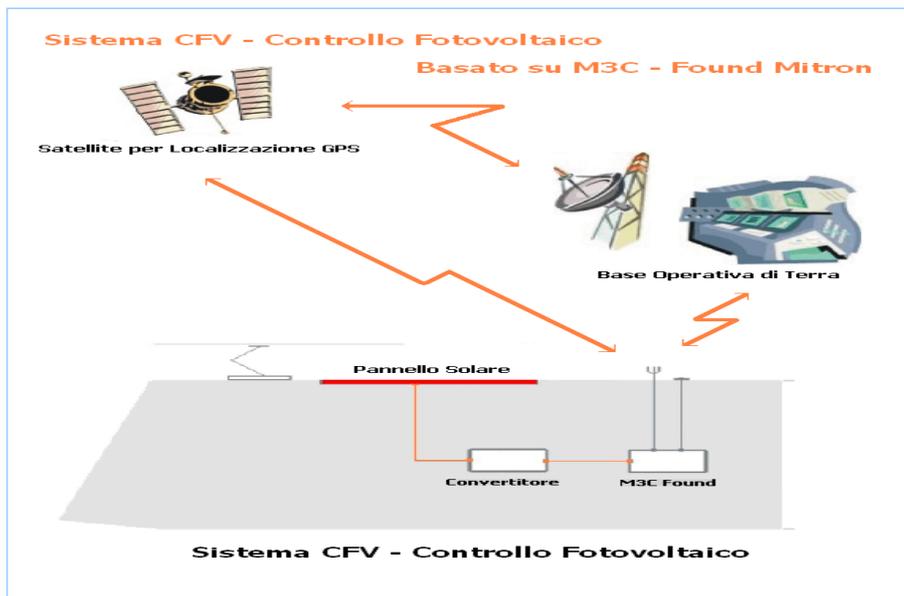



Fig. 10

Il sistema *real time* è stato installato sui seguenti rotabili: Locomotiva Elettrica E 636, Locomotiva Diesel Aln 668, Carri Merci tipo Habillss e Carrozze passeggeri.

Questo sistema consente di avere sotto controllo lo stato energetico giornaliero di ogni singolo rotabile attrezzato con il sistema di misurazioni e presenta il vantaggio di misurazioni praticamente istantanee, al contrario del *field point* che richiede scarico dati e successiva post elaborazione. Risulta disponibile il grafico della potenza assorbita dalla batteria settabile per periodo e per campionamento.

Il sistema permette per il carro anche la rilevazione della posizione con sistema GPS.

Tale sistema consente:

- connessione continua al rotabile, in tempo reale, grazie all'utilizzo della tecnologia GPRS;
- individuazione della posizione del rotabile grazie all'utilizzo della tecnologia GPS;
- memorizzazione, a bordo del modulo M3C – Found, dei dati misurati in aree non coperte da GPRS, con scarico automatico verso la centrale operativa al ripristinarsi della copertura GPRS
- utilizzo di cartografia ad altissimo dettaglio da parte della centrale operativa;
- visualizzazione dei dati messi a disposizione dalla centrale operativa mediante una semplice connessione internet da qualsiasi sede di Trenitalia;
- rappresentazione grafica ed analitica dei dati misurati da pannello fotovoltaico e batteria, con possibilità di selezione parametrica degli intervalli di tempo da monitorare ed esportazione locale dei dati in formato Microsoft – Excel;
- possibilità di espansione del sistema per il monitoraggio totale dei dati di esercizio del rotabile;
- grande economia di esercizio grazie alla connessione continua GPRS mediante un canale dati;
- grande affidabilità del sistema grazie alla specifica progettazione per ambiente ferroviario e militare.

7. DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ E DEI RISULTATI

Il progetto è stato articolato in 6 Task, come di seguito riportato nel dettaglio

7.1 Task 1 - Scenario Energetico Ambientale

DATE PREVISTE: DAL 01/11/2002 AL 01/02/2003
DATE EFFETTIVE: DAL 01/11/2002 AL 01/02/2003

7.1.1 Cosa era previsto

Il progetto nasce con l'obbiettivo di valutare una tecnologia innovativa che contribuisca alla riduzione delle emissioni inquinanti in atmosfera dovute ai consumi energetici necessari per il servizio ferroviario (in particolare quelli per i servizi ausiliari di bordo alimentati dagli accumulatori). Per poter effettuare una successiva valutazione dell'efficacia della tecnologia individuata, è previsto un iniziale monitoraggio della situazione esistente, in relazione ai consumi energetici, e una conseguente analisi di emissioni inquinanti nel campo della trazione ferroviaria. Tale analisi sarà sviluppata nella *"Relazione su indagine di Mercato – Scenario Ambientale".*

La scelta della tecnologia fotovoltaica più idonea all'applicazione sia in termini di caratteristiche energetiche che meccaniche dei pannelli fotovoltaici, prevede un'analisi di mercato nazionale/europeo per i pannelli fotovoltaici (sarà riportato nella *"Relazione su indagine di Mercato – analisi del mercato fotovoltaico").*

Obiettivo dell'attività prevista nella task è di quantificare i consumi e i livelli attuali di inquinamento nonché di effettuare l'analisi di mercato con l'individuazione dei moduli fotovoltaici più idonei per l'applicazione ferroviaria.

Per poter valutare la performance del sistema fotovoltaico progettato, si prevede la definizione di indicatori di prestazione i cui valori saranno riportati, a seguito delle prove effettuate, nella *"Relazione sugli indicatori di prestazione".*

Le scelte tecniche e le modalità applicative individuate saranno riportate nel dettaglio nella *"Relazione tecnica e modello di analisi".*

I prodotti previsti dalla task sono le seguenti relazioni:
"Relazione su indagine di Mercato – Scenario Ambientale"
"Relazione su indagine di Mercato – analisi del mercato fotovoltaico"
"Relazione sugli indicatori di prestazione"
"Relazione tecnica e modello di analisi"

7.1.2 Cosa è stato fatto

Le attività previste nella task, ovvero quantificazione dei consumi e dei livelli di inquinamento, l'analisi di mercato con successiva individuazione di pannelli fotovoltaici idonei alla sperimentazione, l'identificazione di indicatori di prestazione e la descrizione delle scelte tecniche individuate, sono state effettuate come previsto con la stesura delle relazioni indicate.

7.1.3 Risultati ottenuti

L'attività ha realizzato la tre relazioni previste, ovvero, Relazione su indagine di Mercato, Relazione su indicatori di prestazione, Relazione tecnica e modello di analisi, per le quali si riportano brevemente i risultati.

La *Relazione su indagine di mercato* si è sviluppata su due scenari: l'analisi ambientale della ferrovia italiana in termini di consumi energetici ed emissioni inquinanti (*Relazione su indagine di*

Mercato – Scenario Ambientale) e l'analisi del mercato nazionale/europeo dei pannelli fotovoltaici per poter individuare la tipologia, in termini di materiale, rendimento e caratteristiche costruttive, più idonea alle esigenze del progetto (*Relazione su indagine di Mercato – analisi del mercato fotovoltaico*).

<u>Relazione su indagine di Mercato – Scenario Ambientale</u>

L'analisi ambientale della ferrovia italiana in termini di consumi energetici ed emissioni inquinanti parte dalle considerazioni per cui è ormai noto che la produzione di energia elettrica da fonti non rinnovabili e l'utilizzo dei mezzi di trasporto siano le maggiori cause dei fenomeni dell'effetto serra e dei cambiamenti climatici, e che non si potrà registrare un'inversione di rotta rispetto a tali tendenze negative senza aver agito concretamente sulle modalità di produzione e di utilizzo dell'energia e sull'applicazione che di esse potranno adottare il mondo industriale e quello dei trasporti.

In tale contesto i più autorevoli studi hanno evidenziato che, in una comparazione ecologica fra le diverse modalità di trasporto, quello ferroviario risulta essere il mezzo più vantaggioso e sostenibile, soprattutto per la minore quantità di emissioni inquinanti e la produzione di gas serra a parità di passeggeri trasportati. E' bene ricordare che un viaggiatore che usa il treno, a parità di percorso, già emette un terzo dei gas serra rispetto a quello che usa l'auto.

L'utilizzo di fonti di energia alternative, quindi, e la loro applicazione al trasporto ferroviario consente, con un'unica mossa, di ottenere un vantaggio comune per il mondo dei trasporti e per quello della produzione di energia, instaurando una "best practice" dal valore esemplare.

Nel corso degli ultimi sei anni Trenitalia ha aumentato sensibilmente il numero dei viaggiatori trasportati nel complesso (+3,95%), incrementando sia quelli a media a lunga percorrenza (+5,65%), sia quelli del trasporto regionale (+3,66%). Nello stesso periodo è invece diminuito il valore complessivo dei treni-kilometro (-2,47%). Si è cioè progressivamente introdotta una razionalizzazione del traffico ferroviario che ha portato ad un più alto fattore di riempimento dei treni.

Per quanto riguarda il trasporto merci, gli ultimi sei anni hanno visto crescere le tonnellate trasportate nel complesso del 10%, a fronte di una diminuzione di oltre il 17% dei treni-kilometro effettuati, grazie ad una migliore gestione dei carichi e della loro logistica.

Ciò ha avuto evidentemente delle positive ripercussioni sui consumi e sulle emissioni specifiche.

Trenitalia consuma, per alimentare i suoi treni, sia energia elettrica (lungo le principali dorsali elettrificate del trasporto ferroviario, che costituiscono quasi il 70% del totale), sia gasolio sui treni diesel, principalmente impiegati sulle tratte a bassa frequentazione.

I consumi energetici per trazione nel settore ferroviario, sono diminuiti di circa il 9% dal 1996 al 2001 passando da 1.195.000 a 1.087.000 tep (Fonte: Rapporto Ambientale Trenitalia 2001).

Tale diminuzione (circa l'8,03%) del consumo di energia elettrica (che rappresenta circa l'89% dei consumi totali), presenta un maggiore contributo da parte del trasporto merci (-17,92%), rispetto a quello passeggeri (-5,40%).

Questo risultato si deve alla razionalizzazione del traffico ferroviario ed alla complessiva migliore resa energetica del nuovo materiale rotabile.

Per quanto riguarda invece il consumo di gasolio, la riduzione è stata ancor più consistente: una diminuzione complessiva del 21,47% (passando dalle 130 mila tonnellate del 1996 alle poco più di 100 mila del 2001), anche in questo caso con una quota parte maggiore attribuibile alla gestione merci (-29,92%) rispetto al trasporto passeggeri (19,23%).

Il risultato più importante della diminuzione dei consumi energetici di Trenitalia, è la riduzione delle emissioni in atmosfera dei gas serra e di altri inquinanti.

Queste emissioni sono di due tipi: quelle dirette, causate dall'esercizio dei treni a gasolio lungo le linee non elettrificate, e quelle indirette, derivanti dalla produzione dell'energia elettrica utilizzata.

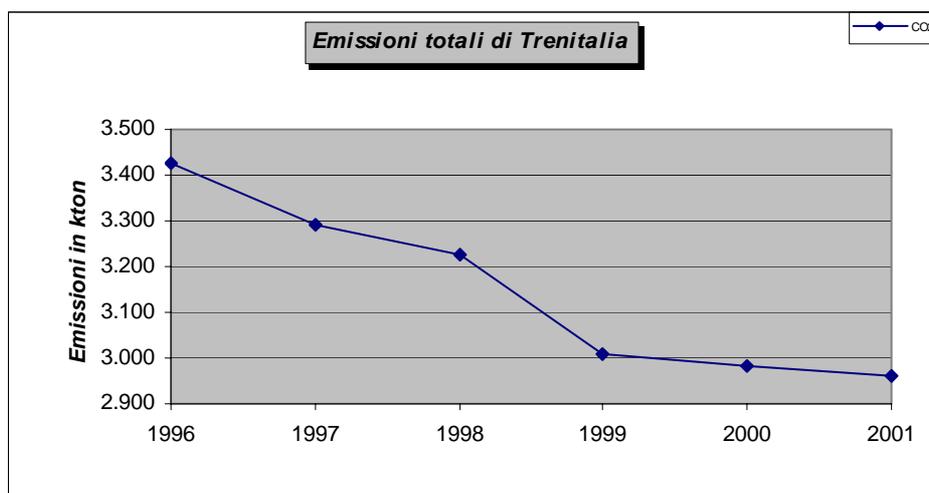
Nel primo caso la quantificazione degli inquinanti prodotti si basa su fattori di emissione medi rappresentativi del parco rotabile diesel circolante, nel secondo si fa riferimento ai valori di emissione, espressi in g/kWh, relativi all'energia elettrica prodotta in Italia.

Per effetto dell'aumento dell'efficienza energetica e di un migliore impiego di combustibili nella produzione, tutti i principali inquinanti legati all'esercizio dei treni (SO2, NOx e PM 10) hanno subito forti riduzioni ed in particolare le emissioni totali di gas serra, provenienti cioè del trasporto merci e passeggeri, nei sei anni considerati sono diminuite quasi del 14 %.

Nella tabella che segue, sono riportati i dati estratti dal "Rapporto ambientale 2001"Trenitalia, riguardanti le emissioni complessive (Trazione elettrica + trazione diesel) rilasciate in atmosfera:

Anno	Anidride solforosa	Ossidi di azoto	Polveri	Gas con effetti equiv a CO2
	SO_2	NO_x	PM_{10}	CO_{2eq}
	t	t	t	t
1996	15.895	15.098	2.362	3.425
1997	13.218	13.538	1.209	3.293
1998	13.062	11.933	1.105	3.223
1999	10.424	10.622	987	3.005
2000	8.910	9.986	913	2.981
Variazione % 1996-2000	-43.95	-33.86	-61.35	-12.97

Il grafico sotto riportato, relativo alle emissioni specifiche di CO2eq, tiene conto dei gas con effetti equivalenti a quelli dell'anidride carbonica, quali CH4 e N2O.

Dall'analisi dei valori delle emissioni totali di Trenitalia, comprensive cioè del trasporto passeggeri e merci, sia alimentato a gasolio che ad energia elettrica, risulta evidente come tutti i parametri siano pressoché costantemente diminuiti nel tempo. I principali inquinanti hanno subito percentuali di abbattimento molto elevate (l'SO2 è scesa del 46,78%, gli NOx del 39,74 e le polveri fini di oltre il 65%). In particolare l'anidride carbonica, causa principale dell'effetto serra, ha subito una diminuzione del 13,6%, passando da 3425 mila tonnellate del 1996 alle 2959 del 2001.

Relazione su indagine di Mercato – analisi del mercato fotovoltaico

L'indagine di mercato parte dall'analisi dei materiali con i quali vengono realizzati i pannelli fotovoltaici.

Il funzionamento dei dispositivi fotovoltaici si basa sulla capacità di alcuni materiali semiconduttori, opportunamente trattati, di convertire l'energia della radiazione solare in energia elettrica in corrente continua senza bisogno di parti meccaniche in movimento. Il materiale semiconduttore quasi universalmente impiegato oggi a tale scopo è il silicio. Attualmente il componente base di un impianto FV è la cella fotovoltaica costituita da silicio in forma cristallina, o da altri materiali, fra i quali, i più usati, sono l'arseniuro di gallio (GaAs), il tellurio di cadmio (CdTe), il diseleniuro di indio e rame (CIS). Questi materiali possono essere trattati per ricavare:

- cristalli a film spesso; in questo gruppo vanno inseriti il silicio monocristallino, il silicio policristallino e l'arseniuro di gallio;
- i materiali a film sottile: questo gruppo include il silicio amorfo, il telluriuro di cadmio e il diseleniuro di indio e rame;
- i materiali per concentrazione: questo gruppo include il silicio e altri materiali con elevato grado di resistenza alle temperature elevate.

Il silicio cristallino è il materiale oggi largamente più utilizzato per la produzione di celle fotovoltaiche anche se occorre parlare di varie tecnologie concorrenti, quali quella del silicio monocristallino, del silicio policristallino, dei film sottili e delle lamine. Si riportano i vantaggi e svantaggi:

Vantaggi
- Prodotto industrialmente stabilizzato
- Elevata disponibilità del materiale base sia come Si sia come SiO_2.
- Elevata uniformità di produzione
- Scarsa tossicità
- Efficienza di conversione relativamente elevata
- Vita utile molto lunga

Svantaggi
- Elevata quantità di materiale necessario
- Tecnologia di produzione che non consente elevati livelli di integrazione (le celle vanno prodotte singolarmente per venire successivamente interconnesse con metodi standard dell'industria elettrotecnica)

Il silicio amorfo è la tecnologia attualmente più sviluppata nel campo della conversione energetica solare, dopo quella del silicio cristallino. Infatti poiché Si-amorfo assorbe la luce diffusa in modo "più efficiente" rispetto al Si cristallino, lo spessore della cella solare può essere fino a 100 volte inferiore (10 micron rispetto a 300), riducendo così in modo considerevole il costo del materiale ed il peso del pannello. Si riportano i vantaggi e svantaggi:

Vantaggi
- Basso costo del materiale
- Bassa tossicità
- Basso livello energetico per la produzione
- Possibilità di realizzazione in forme e dimensioni estremamente variabili (se paragonate ai vincoli esistenti per il silicio cristallino: sono disponibili componenti opachi, semitrasparenti, con elevato grado di flessibilità, ecc.)
- Efficienza pressoché costante all'aumento della temperatura.

Svantaggi

- Tecnologia piuttosto complessa
- Costi di investimenti elevati, legati anche all'utilizzo - in fase di produzione - di materiali potenzialmente tossici.
- Efficienza stabilizzata relativamente bassa (e conseguente ingombro elevato)

L'Arsenurio di gallio è la tecnologia particolarmente utilizzata in applicazioni spaziali e nei sistemi a concentrazione.

Vantaggi

- Efficienza elevata
- Bassa perdita di efficienza al crescere della temperatura

Svantaggi

- Alto costo
- Elevata tossicità dei materiali base

Il vantaggio più evidente dell'utilizzo dell'energia solare per generare elettricità è il fatto che il sole è un combustibile pulito e che quindi i sistemi fotovoltaici producono energia elettrica senza emettere sostanze inquinanti in fase di esercizio (questa affermazione non è del tutto vera per i sistemi che si avvalgono di batterie perché queste richiedono comunque uno smaltimento periodico, che d'altro canto proprio l'uso del fotovoltaico è in grado di rendere meno frequente). L'energia elettrica "pulita" proveniente da fonte fotovoltaica sostituisce una eguale quantità di energia che, in assenza del sistema FV, si sarebbe dovuta produrre mediante fonti tradizionali, in gran parte inquinanti. L'esercizio di un sistema fotovoltaico permette quindi di evitare che un certo quantitativo di inquinanti venga emesso nell'atmosfera, producendo così evidenti benefici ambientali.

Gli impianti fotovoltaici durante il loro funzionamento non richiedono risorse energetiche e pertanto durante la vita utile dell'impianto non vengono emesse sostanze nocive per la salute o per l'ambiente e vengono evitate le emissioni dovute alla produzione "convenzionale" di energia elettrica.

Tuttavia, una considerevole quantità di energia è impiegata per la loro produzione. Per avere un quadro complessivo, sono stati determinati gli aspetti ambientali connessi a tutto il ciclo di vita dell'impianto e all'uso di tali risorse energetiche (analisi del ciclo di vita – LCA).

L'energia necessaria per la produzione della cella include, non solo l'energia consumata durante la produzione, ma anche l'energia posseduta dalle materie prime utilizzate. L'energia di produzione delle celle nel caso di film sottili di silicio amorfo è inferiore a 40 MJ/m2 per la tecnologia attuale. Tuttavia se gli strati depositati dovessero raggiungere spessori inferiori a 10 µm, in questo caso il grado di purezza del materiale di partenza dovrebbe essere più elevato e di conseguenza l'energia necessaria a produrlo maggiore.

L'energia necessaria alla produzione dei materiali incapsulanti include tutti i materiali diversi dallo strato di cella attivo ed i contatti ed esclude ovviamente la cornice del modulo, che è conteggiata a parte.

In genere, per questi materiali è necessaria fino al 50% dell'energia totale richiesta.

A seguito di tale ricerca di mercato, sono state prese in considerazione le caratteristiche tecniche necessarie per la sperimentazione in oggetto ovvero la flessibilità dei pannelli, lo spessore (notevolmente sottili) e l'alta efficienza.

Il modello, dei moduli fotovoltaici, individuato per l'applicazione delle carrozze, è la "Tegola Fotovoltaica" con il sistema a "Tripla Giunzione" che permette una deposizione di tre strati di lega di silicio su un supporto di acciaio flessibile molto sottile.

Tale modulo in silicio amorfo a tripla giunzione, così detto in quanto ogni cella del modulo è composta dalla giunzione di tre semiconduttori disposti uno sull'altro, ha la seguente funzionalità: la cella inferiore assorbe la luce rossa, la cella nel mezzo la luce gialla e l'ultima assorbe la luce blu.

La capacità di dividere lo spettro della luce è la chiave dell'alta efficienza, specialmente ai bassi livelli di irraggiamento e sotto luce diffusa. Il silicio amorfo, inoltre, depositato su un sottilissimo supporto d'acciaio risulta essere flessibile e quindi applicabile con più facilità rispetto al silicio cristallino anche su superfici non piane .

Le motivazioni che hanno condotto alla scelta di tale tipologia di pannello, sono una migliore efficienza dovuta alla possibilità di utilizzare con migliore efficacia la luce diffusa e una migliore capacità di adattamento alla superficie di applicazione sottostante (imperiale delle carrozze avente superficie curva).

Per l'applicazione su locomotori e carri merci, sono stati scelti i moduli US 116 sempre in silicio amorfo in tripla giunzione che è incapsulato in un polimero, con cornice in alluminio anodizzato, e applicato su una lastra di acciaio.

Relazione sugli indicatori di prestazione

Tale relazione riporta gli indicatori significativi per la verifica prestazionale dell'installazione dei pannelli fotovoltaici sulle tre diverse tipologie di veicoli ferroviari individuati per la sperimentazione ovvero per le carrozze, carri merci e locomotori.

Sono stati individuati i seguenti indicatori:

1. Adesione dei pannelli sull'imperiale (tetto del rotabile o fiancata delle locomotive);
2. Degrado prestazionale del pannello;
3. Influenza dell'inquinamento ambientale;
4. Influenza dell'interferenze elettromagnetiche;
5. Influenza del rumore aerodinamico dovuto all'inserzione dei pannelli.

Gli indicatori di prestazione sono stati descritti nel punto 6.6"Sistemi di misurazione utilizzati".

Relazione tecnica e modello di analisi

La Relazione tecnica e modello di analisi riporta nel dettaglio gli obiettivi del progetto, ovvero la verifica che la sperimentazione della tecnologia fotovoltaica nell'ambito del materiale rotabile ferroviario come fonte di energia diversa da quella tradizionale derivata dalla trazione (alimentazione a 3 kV), sia efficace per l'alimentazione degli accumulatori presenti a bordo dei treni.

Successivamente vengono descritte nel dettaglio le caratteristiche tecniche dei pannelli fotovoltaici utilizzati per la sperimentazione ovvero la "Tegola Fotovoltaica" e i moduli US 116 (la cui descrizione è già stata riportata nel punto "6.1. Tecnologie fotovoltaiche").

Si riportano le descrizioni tecniche, sia dal punto di vista meccanico che elettrico, relative alle singole applicazioni delle carrozze, locomotori e carri merci. Tali tecnologie sono descritte nel punto 6 "Tecnica".

Nella relazione tecnica sono descritti i sistemi di misura mediante i quali sono state effettuate le prove sui componenti e sul sistema completo, e riportati i valori ottenuti per verificare la validità del sistema sperimentale.

Le prove vengono effettuate sui seguenti componenti:

- Modulo a Tegola fotovoltaica: prove termiche (prove di invecchiamento) e di resistenza a sollecitazione aerodinamica (prova in galleria nel vento);
- Convertitori: prove funzionali e prove di isolamento.

Sul primo prototipo verranno effettuate una serie di misurazioni nelle seguenti condizioni:

- *rotabile fermo*: prove elettriche per valutare le performance del sistema in termini di efficienza dei singoli apparati, con particolare riferimento alla capacità del sistema (convertitore) di ricercare il punto di erogazione della massima potenza;
- *rotabile in movimento*: prove di colpo di pressione (incrocio con altri treni, ingresso ed uscita dalle gallerie) e prove elettriche analoghe a quelle previste per il rotabile fermo.

Con i valori di tensione e corrente misurati e registrati durante tutto lo svolgimento della campagna di prova sarà possibile effettuare una analisi energetica, e, quindi, valutare la bontà e l'efficacia del sistema pannelli solari.

Il modello di analisi, riportato in tale relazione, parte dalla considerazione del fatto che il progetto sperimentale nasce e si sviluppa per verificare la fattibilità, anche in termini di risultati ambientali, dell'alimentazione degli accumulatori a bordo rotabile, i quali portano differenze di carica a seconda dei rotabili su cui sono posizionati.
In merito a tali differenze si evidenziano le caratteristiche degli accumulatori per i diversi rotabili individuati per la sperimentazione delle carrozze, locomotive e carri merci. Sulla base dei dati raccolti, delle analisi effettuate, è stata predisposta la seguente matrice prestazionale che evidenzia, in base al tipo di consumo previsto per anno per diversa tipologia di materiale rotabile, la taglia dell'impianto fotovoltaico definita dallo spazio disponibile (ovvero se è sufficiente per il tipo di consumo annuale), il quantitativo di riduzione di combustibile primario per tipo di applicazione e la riduzione delle emissioni inquinanti all'anno con l'uso della tecnologia fotovoltaica :

Tipologia	Consumi previsti KWh/anno	Taglia impianto FV kWp	Copertura carico	Risparmio di combustibile primario Tep/anno	Emissioni evitate Kg/anno
Carrozza	1226	1,36	SI	0,28	CO_2: 559 SO_2: 2,81 NO_x: 0,83
Locomotiva	883	1,36	SI	0,20	CO_2: 366 SO_2: 2,02 NO_x: 0,83
Carro	420	1,36	SI	0,10	CO_2:174 SO_2:0,96 NO_x:0,29

I valori relativi alle emissioni evitate sono stati calcolati dalla differenza tra le emissioni generate dalla produzione di energia elettrica con fonte tradizionale (fonte: ENEL Rapporto Ambientale 2001) ed il rilascio di inquinanti ottenuto globalmente con la generazione fotovoltaica.

Si definisce, successivamente, il metodo di calcolo dell'energia generata da un impianto fotovoltaico, alla temperatura di 25 °C, e che può essere calcolata mediante la seguente relazione:

$$E_{an} = P_{inst.} * \eta_{FV} * 365 * R_{mg} * \eta_c$$

dove

E_{an} è l'energia generata annualmente dall'impianto
$P_{inst.}$ è la potenza FV totale installata che per le carrozze bagagliaio è pari a 1,360 kW di picco.
η_{FV} è il rendimento dell'impianto FV conmprensivo dei moduli e delle batterie: in prima approssimazione è valutabile intorno al 75%.
365 giorni annuali
R_{mg} è la radiazione media: viene fornita da apposite tabelle
η_c è il rendimento del convertitore: valutabile ≥ 80 %.

Il coefficiente Rmg (radiazione media) presuppone che la superficie sia orizzontale ovvero in condizioni di massima illuminazione dell'energia solare. In realtà, i pannelli FV installati sulla carrozza non sono perfettamente posizionati sul piano orizzontale, ma seguono il raggio di curvatura della carrozza, pertanto è riportata anche una tabella con l'andamento del coefficiente di radiazione al variare dell'inclinazione del pannello. Comunque le condizioni di mezzo in esercizio o di mezzo fermo non sono facilmente simulabili anche perché occorre tenere conto della riflessione delle varie superfici.

7.1.4 Commenti

Le relazioni "Relazione sugli indicatori di prestazione" e "Relazione tecnica e modello di analisi" sono state relazioni in itinere, in quanto riportano i risultati ottenuti dalle prove e misure effettuate nel corso del progetto che sono state, quindi, di volta in volta aggiornate con i nuovi risultati. Tali risultati sono comunque riportati nella presente relazione finale nelle task di competenza di ciascuna tipologia di prototipo realizzata (locomotori, carrozze e carri merci).

7.1.5 Difficoltà incontrate

Non sono state riscontrate difficoltà.

7.1.6 Documenti prodotti e/o allegati

I documenti realizzati sono:
"Relazione su indagine di Mercato – Scenario Ambientale"
"Relazione su indagine di Mercato – analisi del mercato fotovoltaico"
"Relazione sugli indicatori di prestazione"
"Relazione tecnica e modello di analisi"
Gli allegati sono già stati consegnati con i presedenti Rapporti e gli aggiornamenti degli allegati sono stati consegnati con il Rapporto Finale del 31.01.06.

7.2 Task 2 - Fotovoltaico per mezzi trainati-carrozze

DATE PREVISTE: DAL 01/02/2002 AL 31/10/2005
DATE EFFETTIVE: DAL 01/02/2002 AL 31/10/2005

7.2.1 Cosa era previsto

L'attività consiste nella progettazione, realizzazione, prove sul campo e feedback delle cinque carrozze prototipo.

Obiettivo dell'attività è di individuare un sistema di ricarica (o mantenimento in carica) delle batterie a bordo delle carrozze, utilizzando l'energia alternativa prodotta dai pannelli fotovoltaici installati sul tetto delle carrozze stesse, con conseguente riduzione dell'inquinamento ambientale sia in termini di minore anidride carbonica (CO_2) emessa in atmosfera, per la produzione di energia elettrica, che di riduzione del numero di batterie da smaltire grazie all'aumento della durata di vita delle batterie stesse.

I prodotti (deliverables) previsti sono cinque carrozze attrezzate con il sistema fotovoltaico costituito dai pannelli fotovoltaici installati sul tetto ed un convertitore/regolatore per trasformare l'energia fornita dai pannelli (da 60 a 140 V) in energia idonea alla ricarica delle batterie (28,8 V con limitazione della corrente di 45 A).

I risultati previsti consistono nel verificare, come dagli indicatori di prestazione, che non vi sia alcun distacco dei pannelli fotovoltaici dal tetto delle carrozze (target = 0 distacchi), verificare l'eventuale degrado del pannello misurando la potenza di picco generata dovuto all'invecchiamento, misurare l'energia effettivamente utilizzata da due carrozze per la ricarica delle batterie e l'influenza dell'inquinamento ambientale (target =inferiore al 5%) dovuto alla sporcizia (polvere ed altro), verificare eventuali malfunzionamenti (target=0 malfunzionamenti) dovuti alla presenza vicino ai pannelli della linea di alimentazione a 3 kV (effettiva variazione da 2.8 a 3.9 kV) e l'eventuale variazione del rumore all'interno del vano passeggeri dovuto alla installazione dei pannelli sul tetto che dovrebbe produrre aumento del rumore aerodinamico (target = aumento massimo del 3%).

Inoltre, era previsto di tenere sotto controllo l'energia effettivamente utilizzata, prodotta dal sistema FV, per la carrozza bagagliaio n° 61839590100.1.

7.2.2 Cosa è stato fatto

L'attività ha realizzato i prototipi di 5 carrozze completamente attrezzate con il l'intero sistema fotovoltaico (pannelli e convertitore). Le cinque carrozze attrezzate sono due carrozze bagagliaio, assegnate a Sperimentazione (UTMR - Unità Tecnologie Materiale Rotabile) di cui una con il sistema di misurazione per valutare l'energia acquisita per la ricarica delle batterie (510 Ah), una carrozza passeggeri (tipo Media Distanza) per il trasporto regionale, una per il "Treno Verde" (ambedue equipaggiate con batterie da 340 Ah) e una carrozza interregionale con batterie da 510 Ah (Piano Ribassato) assegnata inizialmente alla regione Puglia e successivamente alla regione Lazio dal dicembre 2004.

Per l'applicazione, come descritto nel punto "6.1. Tecnologie fotovoltaiche", sono stati realizzati *vassoi* come matrici di strisce di "Tegola Fotovoltaica" su un su una lamiera flessibile di acciaio inox di spessore 1,5 mm.

L'idea della realizzazione dei vassoi, ovvero di un sistema modulare, nasce anche allo scopo di favorire gli interventi di manutenzione dovuti a eventuali avarie o danneggiamenti di un pannello.

L'applicazione elettrica del sistema fotovoltaico ha comportato la progettazione di un convertitore per la separazione galvanica tra il circuito di batteria e i pannelli fotovoltaici. Tale convertitore ha la funzione di trasformare l'energia prodotta dai pannelli fotovoltaici (nelle condizioni di massima

potenza 1360 W e alla tensione di 80 V) in energia elettrica idonea alla ricarica delle batterie delle carrozze alla tensione di circa 29 V, nonché di garantire l'isolamento galvanico della linea di alimentazione (3 kV in corrente continua), in caso di contatti accidentali come ad esempio nel caso di rottura del filo sagomato della linea di contatto, con conseguente caduta del cavo sui pannelli.

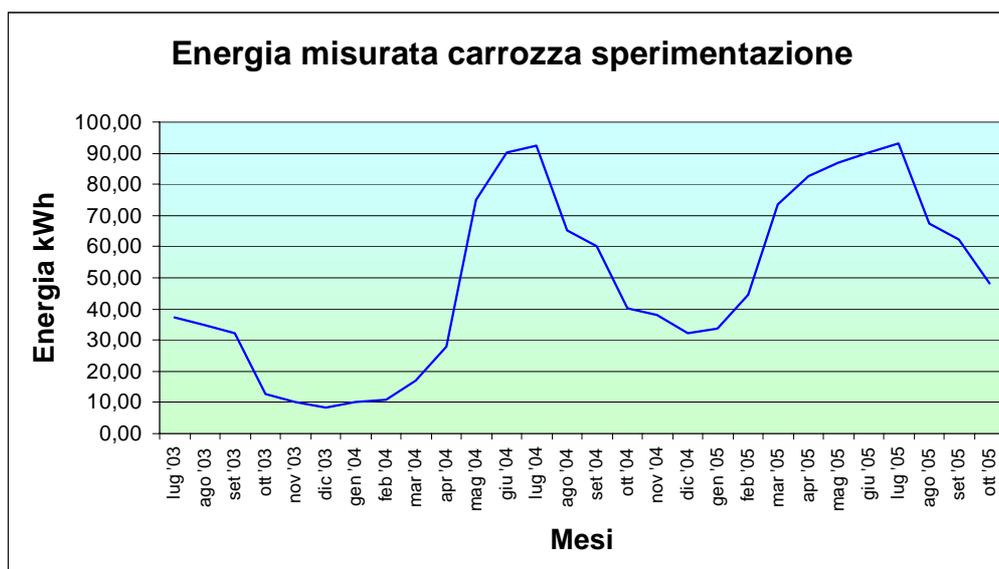
Al completamento dei prototipi carrozze, sono state effettuate, come previsto, le prove e misure sui cinque prototipi utilizzando i sistemi di misura *field point*, per la carrozza n° 61839590100.1, e *real time.*

7.2.3 Risultati ottenuti

La realizzazione delle carrozze con il sistema fotovoltaico ha dimostrato la fattibilità tecnica per l'installazione dei pannelli fotovoltaici (tipo silico-amorfo) con convertitore/regolatore per la ricarica delle batterie.

I risultati ottenuti dall'analisi, secondo gli indicatori di performance, mostrano che non si è verificato alcun distacco (distacchi = 0 con target = 0) per nessuna delle 5 carrozze; non risultano malfunzionamenti dovuti alla presenza della linea di alimentazione a alta tensione (3 kV) vicino ai pannelli (malfunzionamenti = 0 con target = 0); la misurazione del rumore sulla carrozza bagagliaio, alla velocità di 180 km/h, ha fornito rispettivamente 81 e 79 db (ovvero un aumento della rumorosità del 2.46 % che rientra nel target stabilito del 3 %).

Le misure per la valutazione del degrado ambientale dei pannelli, dovuta alla presenza di polveri e sporcizia, sono state fatte sui due bagagliai UTMR di cui il n° 51839590104.5 (misura del 28 giugno '04) con i pannelli lavati con getto d'acqua il giorno precedente e sul n° 61839590100.1 (misura del 30 giugno '04) con pannelli mai lavati. Il risultato della misurazione per il degrado ambientale è del 2,2%, inferiore al target del 5% stabilito.

I risultati delle prove e misure effettuati sulla carrozza bagagliaio UTMR, la prima ad essere stata realizzata, riportano (per il periodo che va da Luglio 2003 ad Ottobre 2005) i seguenti valori di energia prodotta e di anidride carbonica non immessa in atmosfera, tenendo conto che per ogni kWh di energia prodotta da fonte rinnovabile piuttosto che da fonti tradizionali si hanno 750 g di anidride carbonica in meno immessa in atmosfera:

Periodo di misura	Luglio 2003 – Ottobre 2005
Energia Prodotta	1378,42 kWh
Riduzione di Anidride Carbonica	1033,82 Kg

Dall’analisi del grafico sopra riportato, si evidenzia quanto segue:

- l’energia prodotta nel periodo Luglio-Settembre 2004 è ben superiore all’energia prodotta nello stesso periodo dell’anno 2003. Tale maggiore resa energetica, è dovuta alla messa a punto del convertitore (avvenuta nel mese di Maggio 2004), del meccanismo di aggancio alla massima potenza;
- l’energia prodotta dai pannelli fotovoltaici nei mesi di Luglio 2004 e Luglio 2005 è la stessa, a conferma della caratteristica del pannello fotovoltaico al silicio amorfo di superficie autopulente; infatti in tale anno non si è verificato alcun degrado prestazionale a causa allo sporco (inquinamento atmosferico, sporco ferroviario…).

Nel corso dell’anno concesso di proroga, sono state implementate le misure sulle altre carrozze prototipo (bagagliaio-carrozza misure, treno verde, carrozza passeggeri Media Distanza, carrozza passeggeri Piano Ribassato).

Complessivamente nel corso dei 2 anni e mezzo (considerando i successivi tempi necessari per la realizzazione dei prototipi a partire dal primo concluso nel Giugno 2003) l’energia prodotta dai pannelli fotovoltaici, in funzione del consumo delle batterie che alimentano i servizi ausiliari, e la rispondente riduzione di Anidride Carbonica non immessa in atmosfera sono:

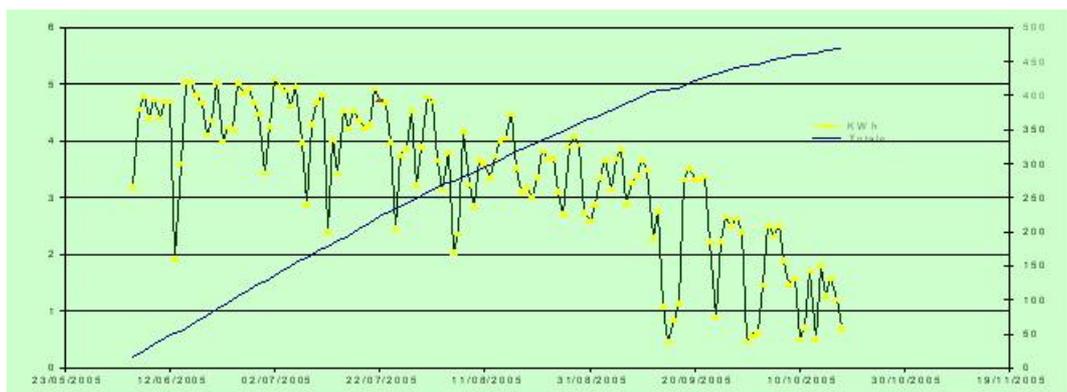
Periodo di misura	Luglio 2003 – Ottobre 2005
Energia Prodotta dalla tipologia carrozze	4506,77 kWh
Riduzione di Anidride Carbonica	3380,08 Kg

Nella tabella seguente si riporta per la carrozza bagagliaio il raffronto fra l’energia attesa teorica ed l’energia effettivamente utilizzata:

	Energia teorica attesa (zona di riferimento Firenze) (kWh)	**Energia utilizzata periodo giu-04 – mag-05 (kWh)**
Carrozza bagagliaio n°61839590100.1	1200,295	740,67

Come si vede il fattore di utilizzazione dell’energia elettrica, è del 62 % di quella teoricamente disponibile. Occorre fare le seguenti considerazioni:

- una volta che le batterie sono cariche queste non assorbono più energia;
- la carrozza, per la natura del servizio svolto, si è mossa nella zona fra Firenze, Roma e Bologna ove ci sono frequenti gallerie, ponti, viadotti e frequenti zone d’ombra per cui l’illuminazione a cui sono esposti i pannelli è nettamente inferiore rispetto a pannelli installati su fabbricato.

Occorre osservare, inoltre, che per questa carrozza nel periodo Giugno 2005 – Settembre 2005 si è verificata l’avaria al convertitore principale dei servizi ausiliari senza che si registrasse alcun disservizio; infatti il sistema fotovoltaico ha sopperito a tutte le necessità energetiche relative ai servizi ausiliari. A tal proposito si allega il grafico dell’energia utilizzata:

7.2.4 Commenti

L'estensione dell'applicazione del sistema FV sui rotabili richiederebbe la ricerca di un adifferente tecnologia del sistema fotovoltaico in quanto risulta ancora difficile garantire la stabilità per lungo periodo dei pannelli sull'imperiale. Infatti le ripetute sollecitazioni meccaniche/aerodinamiche e gli agenti corrosivi mettono a dura prova gli ancoraggi meccanici del sistema. Risulta, quindi, necessario individuare una tecnologia innovativa per l'estensione dell'applicazione come per esempio la diffusione della materia attiva FV sotto forma di multistrato sulla lamiera costituente l'imperiale.

Nel periodo di osservazione non si è rilevato alcun inconveniente per gli accumulatori applicati sulle carrozze.

7.2.5 Difficoltà incontrate

Le difficoltà riscontrate sono legate all'applicazione sui rotabili e sono le seguenti:

- individuazione della tecnologia e tipologia di pannello più idonea. Infatti, il mercato è orientato per applicazioni civili ed industriali e non per applicazioni che sottopongono gli apparati ad elevate vibrazioni ed urti;
- l'applicazione dei pannelli sull'imperiale dei rotabili richiede la garanzia di stabilità per lunghi periodi, oltre 20-30 anni per cui è stato necessario ideare accorgimenti di ancoraggio con elevata richiesta di mano d'opera per l'applicazione;
- messa a punto del convertitore che è stato progettato e realizzato per la specifica applicazione fotovoltaica per i mezzi ferroviari.

Nel mese di maggio 2004, è stata fatta la messa a punto del convertitore che ha richiesto circa dieci giorni di misurazioni e taratura. Il convertitore progettato e realizzato per lo specifico impianto fotovoltaico, infatti, ha presentato inizialmente una non corretta taratura del software di controllo, per la massima resa del sistema fotovoltaico. Infatti, la ricerca del punto di generazione della massima potenza del sistema, al variare delle condizioni d'illuminazione (anche alla presenza di nubi, zone d'ombra o alle diverse ore del giorno), costituisce uno degli anelli più importanti del sistema fotovoltaico. Si tenga presente che i mezzi sotto osservazione sono soggetti a movimento continuo per cui la variazione dell'intensità luminosa, dovuta alla luce incidente, risulta estremamente varabile per la continua variazione della posizione, la presenza di zone d'ombra dovute a cavalcavia, gallerie, fabbricati, ecc. A seguito delle diverse misure effettuate per la taratura del sistema, con annesse prove di generazione di potenza, è stato ottenuto che, in tutte le condizioni, la perdita di potenza è inferiore a 20 W.

Tali difficoltà hanno comportato un ritardo nella realizzazione dei prototipi, che è stato successivamente recuperato, non influenzando, quindi, la data di fine progetto.

7.2.6 *Documenti prodotti e/o allegati*

Risultati del test sulla carrozza bagagliaio

Gli allegati sono già stati consegnati con il Rapporto Intermedio del 31.01.05.

7.3 Fotovoltaico per mezzi trainati-carri merci

DATE PREVISTE: DAL 01/11/2003 AL 31/10/2005
DATE EFFETTIVE: DAL 01/11/2003 AL 31/10/2005

7.3.1 *Cosa era previsto*

L'attività consiste nella progettazione, realizzazione, prove sul campo di tre carri prototipo e Feedback.

Obiettivo dell'attività è di individuare un sistema di ricarica (o mantenimento in carica) delle batterie per l'alimentazione delle elettroserrature (installate sui carri merci per protezione di merci di valore) comandate mediante sistema GPS (Global Positioning System) utilizzando, come energia alternativa, pannelli fotovoltaici con conseguente riduzione dei costi di sostituzione delle batterie e, quindi, dell'inquinamento ambientale dovuto allo smaltimento delle stesse. Infatti il sistema fotovoltaico individuato consente di effettuare una ricarica costante delle batterie, garantendo l'alimentazione/buono stato di carica degli accumulatori con un migliore sistema di ricarica, tale da consentire l'allungamento della vita utile delle batterie stesse.

La progettazione del sistema fotovoltaico per i carri merci, prevede di individuare una tipologia di pannello fotovoltaico differente da quello utilizzato sulle carrozze, allo scopo di acquisire quanti più elementi possibili per il giudizio tecnico definitivo.

I prodotti (deliverables) previsti da tale attività sono tre carri merci attrezzati con il sistema fotovoltaico costituito da pannelli fotovoltaici ubicati sul tetto ed un convertitore/regolatore posizionato all'interno del carro, necessario per trasformare l'energia fornita dai pannelli (da 60 a 140 V) in energia idonea alla ricarica di due batterie da 12 V e 26 Ah (13.87 V con limitazione corrente di 5 A).

I risultati previsti dell'attività sono di verificare, oltre alla produzione di energia elettrica idonea per la ricarica degli accumulatori, che non vi sia alcun distacco dei pannelli dal tetto dei carri (target = 0 distacchi) e che non si verifichi un eventuale degrado del pannello dovuto all'invecchiamento (misurando la potenza di picco generata) o all'influenza dell'inquinamento ambientale (target = inferiore al 5 %) dovuto alla sporcizia, polvere ed altro.

7.3.2 *Cosa è stato fatto*

L'attività ha realizzato la progettazione dei prototipi di 3 carri merci tipo H 32 completamente attrezzati con il sistema fotovoltaico (pannelli e convertitore) idonei alla ricarica degli accumulatori da 12 V 26 Ah (come descritto nel dettaglio nel punto "6.Tecnica").

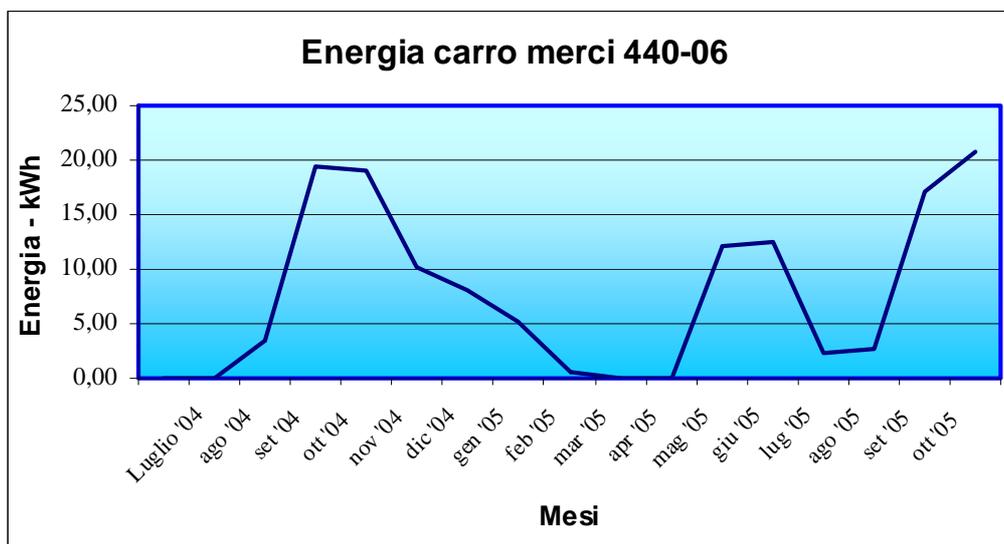
Si evidenzia che il carro H32 è dotato di tre banchi di batterie da 12 Volt e 10 ÷18 A, di cui due, servono per l'alimentazione dell'elettroserrature, e una per l'alimentazione del GPRS. I suddetti banchi di batterie sui carri non sono, attualmente, dotati di ricarica e mediamente ogni tre mesi devono essere sostituiti.

7.3.3 Risultati ottenuti

La tipologia di pannello fotovoltaico completamente diverso da quello “a Tegola” utilizzato sulle carrozze, ha richiesto notevole sforzo di progettazione dovuto anche alla necessità di rispettare l’ingombro massimo del carro (sagoma limite UIC): la realizzazione dei carri con il sistema fotovoltaico ha dimostrato la fattibilità tecnica per l’installazione dei pannelli solari (tipo silico-amorfo) con convertitore/regolatore per la ricarica delle batterie di alimentazione delle elettroserrature e del GPS a 12 V.

Nel mese di agosto 2004 è stato installato su un carro il sistema di misurazione real time che consente a distanza tramite computer, su pagina web, la telemisurazione dell’energia utilizzata per la ricarica degli accumulatori installati a bordo.

Si riportano i dati delle prove e misure eseguite mediante il sistema di telemisura *real time* sul carro, n° 31 83 285 2 440-06, nel periodo Agosto 2004 a Ottobre 2005 , che riportano i seguenti valori di energia prodotta e di riduzione di immissione di anidride carbonica in atmosfera:

Periodo di misura	*Agosto 2004 – Ottobre 2005*
Energia Prodotta	*133,50 kWh*
Riduzione di Anidride Carbonica	*100,12 Kg*

Analizzando il grafico, si osserva che nei mesi di Marzo-Aprile 2005 l’energia rilevata è nulla per avaria al sistema di trasmissione dati per cui i risultati, di tali mesi, non sono disponibili.

Nel corso dell’anno concesso di proroga, sono stati montati i sistemi di misura anche sugli altri 2 carri merci. Complessivamente l’energia prodotta dai pannelli fotovoltaici, in funzione del consumo delle batterie che alimentano i servi ausiliari, e la rispondente riduzione di Anidride Carbonica non immessa in atmosfera sono:

Periodo di misura	Agosto 2004 – Ottobre 2005
Energia Prodotta dalla tipologia carri merci	275,79 kWh
Riduzione di Anidride Carbonica	206,84 Kg

Dall’analisi degli indicatori di prestazione si evidenzia che non si è avuto nessun distacco (distacchi = 0 con target = 0) dei pannelli fotovoltaici per nessuno dei carri merci realizzati, non

risultano malfunzionamenti dovuti alla presenza della linea di alimentazione ad alta tensione (3 kV) vicino ai pannelli (malfunzionamenti = 0 con target = 0).

Nella tabella seguente si riporta, per il carro merci, il raffronto fra l'energia attesa teorica e l'energia effettivamente utilizzata:

	Energia teorica attesa (zona di riferimento Firenze) (kWh)	**Energia utilizzata periodo ago-04 – lug-05 (kWh)**
Carro merci n° 31 83 285 2 440-06	226,330	90,46

Come si vede il fattore di utilizzazione dell'energia elettrica è del 39,9 % di quella teoricamente disponibile.

Occorre fare le seguenti considerazioni:

- il carro merci non possiede generalmente alimentazione elettrica, se non, per particolari applicazioni come nel caso delle elettroserrature;
- il numero dei pannelli utilizzati è superiore alle reali necessità, di circa il 30 %, ma per problematiche legate al contenimento dei costi e per riuscire a produrre i prototipi in tempi brevi si è utilizzato il medesimo convertitore *customizzato* per i 10 prototipi. Il convertitore è stato riprogettato nello stadio finale per ottenere l'uscita a 12V invece che a 24 V come per gli altri rotabili.

7.3.4 Commenti

E' stata effettuata la modificata della Specifica Tecnica relativa al convertitore per prevedere l'uscita di alimentazione a 12 V.

7.3.5 Difficoltà incontrate

Il convertitore ha presentato le stesse difficoltà di taratura descritte nel punto 7.2.5.

Inoltre è stato nuovamente ri-progettato lo stadio d'uscita del convertitore in modo di renderlo idoneo alla ricarica di batterie da 12 V.

7.3.6 Documenti prodotti e/o allegati

I disegni per l'applicazione dei pannelli fotovoltaici sull'imperiale del carro.

La Specifica Tecnica del convertitore aggiornata

Gli allegati sono già stati consegnati con il Rapporto Intermedio del 10.06.04

7.4 Task 4 - Fotovoltaico per mezzi trainanti-locomotori

DATE PREVISTE: DAL 01/11/2003 AL 31/10/2005
DATE EFFETTIVE: DAL 01/11/2003 AL 31/10/2005

7.4.1 Cosa era previsto

L'attività consiste nella progettazione, realizzazione, prove sul campo e Feedback dei due prototipi locomotori realizzati.

Obiettivo dell'attività è di individuare un sistema di ricarica (o mantenimento in carica) delle batterie a bordo dei locomotori, utilizzando l'energia alternativa prodotta dai pannelli fotovoltaici installati sul tetto dei locomotori stessi, con conseguente riduzione dell'inquinamento ambientale sia in termini di minore CO_2 emessa in atmosfera (per la produzione di energia elettrica) che di riduzione del numero di batterie da smaltire grazie all'aumento della durata delle batterie stesse.

I prodotti (deliverables) previsti dell'attività sono la realizzazione di due prototipi di locomotive di cui una elettrica E636 ed una Automotrice Leggera a Nafta passeggeri (motore diesel) Aln668 attrezzate con il sistema fotovoltaico costituito da pannelli fotovoltaici tipo US 116 da 116 Wp ubicati sul tetto ed un convertitore/regolatore per trasformare l'energia fornita dai pannelli (da 60 a 140 V) in energia idonea alla ricarica delle batterie (31.5 V per la locomotiva elettrica e 28.8 V per la diesel).

La scelta dell' automotrice Aln 668 (Aln -Automotrice leggera nafta) nasce dalla volontà di sperimentare una differente tipologia di locomotiva (diesel), valutando, quindi, gli effetti di inquinamento dello scarico dei motori diesel.

I risultati previsti dell'attività sono di verificare, oltre alla produzione di energia elettrica idonea per la ricarica degli accumulatori, che non vi sia alcun distacco dei pannelli dal tetto delle locomotive (target=0 distacchi) e che non si verifichi un eventuale degrado del pannello dovuto all'invecchiamento, misurando la potenza di picco generata, o all'influenza dell'inquinamento ambientale dovuto alla sporcizia, polvere ed altro (target = inferiore al 5 %).

7.4.2 Cosa è stato fatto

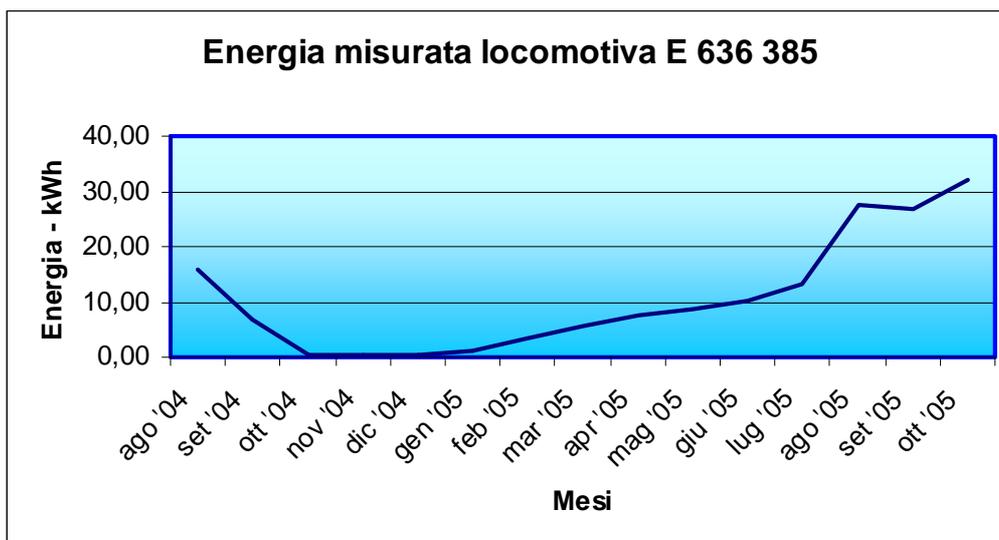
L'attività ha realizzato la progettazione dell'applicazione per la locomotiva E636, effettuata presso l'officina FS di Verona, mentre la progettazione per l'automotrice Aln 668 che è stata realizzata presso l'officina FS di Foggia (come descritto nel punto "6. Tecnica").

L'applicazione dei moduli fotovoltaici sull'imperiale dei locomotori è risulta particolarmente impegnativa per la presenza dei componenti funzionali presenti sull'imperiale del locomotore stesso di cui si è dovuto tener conto nella progettazione.

I locomotori sono stati attrezzati con il sistema di telemisurazione che, come per gli altri prototipi, permette la rilevazione dell'andamento della produzione di energia elettrica in maniera simultanea.

7.4.3 Risultati ottenuti

Dalle prove e misure eseguite mediante il sistema di telemisura *real time* sulla ***Locomotiva E 636 385_*** nel periodo da Agosto 2004 a Ottobre 2005, sono stati rilevati i seguenti valori di energia prodotta e di riduzione di immissione di anidride carbonica in atmosfera (tenendo conto che per ogni kWh di energia prodotta da fonte rinnovabile piuttosto che da fonti tradizionali si hanno 750 g di anidride carbonica in meno immessa in atmosfera):

Periodo di misura	Agosto 2004 – Ottobre 2005
Energia Prodotta	159,93 kWh
Riduzione di Anidride Carbonica	119,95 Kg

Analizzando il grafico, si osserva che nei mesi Novembre 2004-Gennaio 2005 l'energia rilevata è nulla a causa dell'avaria del sistema di trasmissione dati per cui i risultati, di tali mesi, non sono disponibili.

Nella tabella seguente si riporta per la *Locomotiva E 636* il raffronto fra l'energia attesa teorica ed l'energia effettivamente utilizzata:

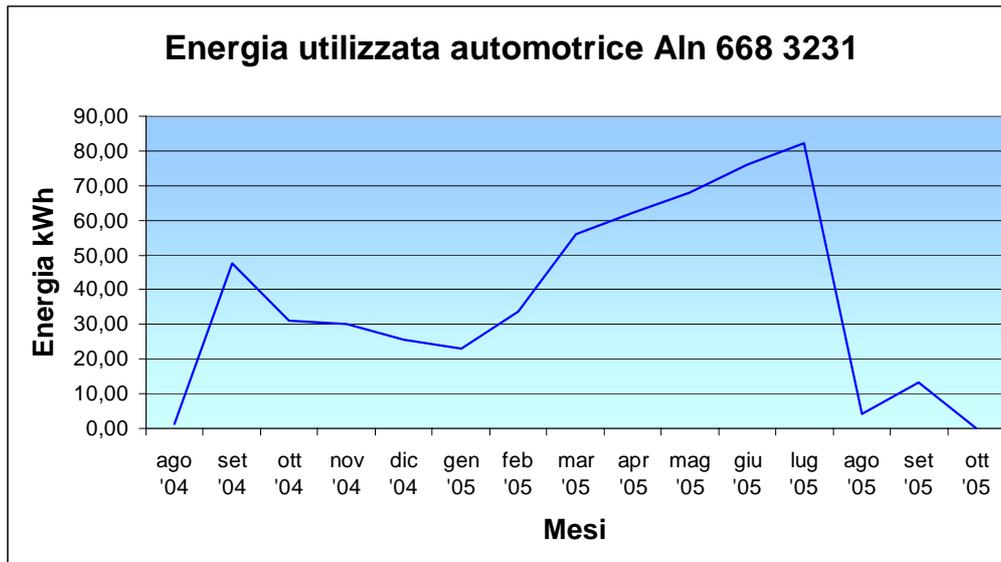
	Energia teorica attesa (zona di riferimento Firenze) (kWh)	**Energia utilizzata periodo ago-04 – lug-05 (kWh)**
Locomotiva elettrica E 636 385	647,034	73,57

Come si vede il fattore di utilizzazione dell'energia elettrica è del 11,37 % di quella teoricamente disponibile.

Occorre fare le seguenti considerazioni:

- il poco spazio disponibile sul tetto dei locomotori, come già detto, ha comportato una limitazione nell'applicazione dei pannelli fotovoltaici in termini di numero e di posizionamento dei pannelli stessi, obbligando l'installazione anche sul lato (in tal caso i pannelli fotovoltaici captano la luce riflessa che comporta una ridotta produzione di energia elettrica);
- inoltre, i frequenti fermo –macchina necessari per la manutenzione richiedono il ricovero del rotabile all'interno delle officine di manutenzione, per cui il periodo di esposizione alla luce solare viene fortemente ridotto.

Le prove e misure effettuate sull'***Automotrice diesel Aln 668 332*** riportano i seguenti valori di energia elettrica prodotta e anidride carbonica non immessa in atmosfera:

Periodo di misura	*Agosto 2004 – Ottobre 2005*
Energia Prodotta	*540,68 kWh*
Riduzione di Anidride Carbonica	*405,51 Kg*

I risultati ottenuti nel corso delle sperimentazioni, hanno confermato la caratteristica della superficie del pannello fotovoltaico di essere autopulente. Lo sporco derivante dai fumi del motore diesel non hanno degradato le prestazioni dei pannelli.

Dall'analisi degli indicatori di prestazione si evidenzia che non si è verificato alcun distacco (distacchi = 0 con target = 0) per nessuna delle due locomotive e che non risultano malfunzionamenti dovuti alla presenza della linea di alimentazione ad alta tensione (3 kV) vicino ai pannelli (malfunzionamenti = 0 con target = 0).

Nella tabella seguente si riporta per l'*Automotrice Aln 668* il raffronto fra l'energia attesa teorica ed l'energia effettivamente utilizzata:

	Energia teorica attesa (zona di riferimento Firenze) (kWh)	**Energia utilizzata periodo set-04 – ago-05 (kWh)**
Automotrice diesel Aln 668 3231	978,990	539,51

Come si vede il fattore di utilizzazione dell'energia elettrica è il 55,10 % di quella teoricamente disponibile. Occorre fare le seguenti considerazioni:

- nonostante i frequenti fermo –macchina necessari per la manutenzione, analogamente alla locomotiva E 636, il sistema FV ha fornito risultati interessanti.

7.4.4 Commenti

La scelta di installare il sistema FV sia sulla locomotiva elettrica che sull'automotrice diesel, nasce dalla volontà di confrontare i risultati di due differenti applicazioni di mezzi, con stesso utilizzo, ma tecnologie di alimentazione diverse.

L'applicazione sulla Locomotiva Elettrica E 636 presenta le caratteristiche di limitazione di spazio sul tetto (per presenza di componenti ferroviari come il pantografo) e di installazione dei pannelli fotovoltaici sul lato della locomotiva stessa (lavorando così con la luce riflessa), nonché di riduzione di efficienza dei pannelli fotovoltaici a causa delle sporco ferroviario, come gli spruzzi di olio e grasso utilizzato per la lubrificazione dei pantografi: purtroppo il risultato fornito non risulta incoraggiante.

L'applicazione sull'Automotrice Aln 668, invece, ha sul tetto una maggiore superficie disponibile (per mancanza del pantografo) e una disposizione dei pannelli fotovoltaici pressoché orizzontale,

mentre gli effetti dei residui della combustione del gasolio, altro problema che si voleva valutare, sembra non influenzare il sistema.

7.4.5 *Difficoltà incontrate*

Nell'attività di progettazione del sistema fotovoltaico per i locomotori, sono state riscontrate alcune difficoltà tecniche per la presenza di componenti ferroviari sul tetto dei locomotori stessi, pertanto è stato necessario individuare mezzi di trazione ferroviaria con maggiore disponibilità di spazio, quali appunto i due individuati.

7.4.6 *Documenti prodotti e/o allegati*

Disegno n° 3161dell'applicazione meccanica per la locomotiva
Gli allegati sono già stati consegnati con il Rapporto Intermedio del 10.06.04

7.5 Task 5 - Progetto nuova carrozza Eurostar

DATE PREVISTE: DAL 01/02/2003 AL 30/07/2003
DATE EFFETTIVE: DAL 01/02/2003AL 30/07/2003

7.5.1 *Cosa era previsto*

L'attività consiste nella progettazione del sistema fotovoltaico per un treno Eurostar, la stesura di un modello di riferimento e la realizzazione di un modellino in scala di dimostrazione della possibile applicazione.

L'obiettivo dell'attività è di verificare la realizzazione di un progetto di copertura di tipo fotovoltaico tecnicamente fattibile nel caso di un treno Eurostar.

I prodotti (deliverables) previsti per tale attività sono lo studio di fattibilità, il modello matematico realizzativo, e il modellino

I risultati previsti sono la realizzazione di uno studio di fattibilità per la costruzione delle nuove carrozze, in ottica di riduzione dei fattori inquinanti (riduzione emissioni CO2).

7.5.2 *Cosa è stato fatto*

L'attività ha realizzato, nel corso dei mesi previsti, lo studio dell'applicazione dei pannelli fotovoltaici in relazione allo spazio disponibile sull'imperiale dell' Eurostar e all'energia necessaria all'alimentazione degli accumulatori (da 360 Ah) per il mantenimento dei servizi ausiliari in caso di mancanza di alimentazione da linea di contatto di 3 kV.

Per la realizzazione di tale impianto fotovoltaico sono stati scelti i pannelli a "Tegola fotovoltaica", organizzati in matrici da 7 strisce cablate in serie tra loro che costituiscono un vassoio (analogamente a quanto realizzato per le carrozze); il progetto prevede l'installazione di 20 vassoi disposti in due file da 10 cablate in serie e in parallelo in modo da fornire la potenza e tensione adatti all'impianto di alimentazione di accumulatori.

E' stato realizzato, inoltre, uno studio di modello matematico ("Modellazione matematica dell'aerodinamica dell'ETR500") per analizzare la distribuzione delle pressioni sull'imperiale dell'intero convoglio per verificare le zone più sollecitate dal punto di vista aerodinamico ovvero per individuare le sollecitazioni a cui sarebbero sottoposti i pannelli fotovoltaici installati sul tetto.

L’analisi dei componenti del rotabile viene affrontata considerando, con la modellazione matematica, separatamente i singoli elementi e le singole situazioni, con l’obiettivo di tenere presente lo scopo per cui essi sono stati costruiti.

A tal fine si terrà conto separatamente di:

Carrozze: sono i moduli dove sono presenti i passeggeri, per questo devono garantire un certo livello di confort che si impone, oltre all’assenza di vibrazioni aerodinamiche, anche una buona silenziosità. Per gli effetti di scia, queste caratteristiche saranno variabili da carrozza a carrozza a seconda della posizione che esse assumeranno nel convoglio. Si faranno analisi iniziali su un treno di discrete dimensioni per poi poter restringere le simulazioni ad un numero più limitato di carrozze per consentire calcoli più rapidi e quindi l’analisi del maggior numero di casi possibili.

Locomotiva: è la prima parte del convoglio ad impattare con l’aria, è quindi quella che è sottoposta alle maggiori sollecitazioni in marcia regolare negli incroci e nelle variazioni dell’ambiente circostante. La sua configurazione influenza inoltre, in modo particolare, anche la funzionalità delle carrozze immediatamente successive ricollegandosi quindi alle questioni di confort, vibrazioni e stabilità appena accennate.

Presenza di vento laterale: tale situazione influenza fortemente la stabilità, non si può quindi prescindere da essa nell’analisi di corpi di così grandi dimensioni.

Ingresso in gallerie: è una situazione molto comune ed ha come effetto dei bruschi aumenti di pressione che si riflettono sia in onde acustiche, sia in sollecitazioni strutturali.

Incrocio con altri treni: è una situazione analoga alla precedente che dipende dalla velocità relativa dei due convogli, può essere di differenti entità e dipende fortemente anche dai tipi di convoglio in esame.

Con il termine “modellazione matematica”, si intende la teoria dell’approssimazione numerica di un gruppo di equazioni prese come modelli di determinati fenomeni fisici per i quali, nel caso dell’aerodinamica, non esistono soluzioni in forma chiusa.

Uno degli aspetti che caratterizza maggiormente le simulazioni numeriche è il tempo di calcolo necessario per ottenere i risultati. Per questa ragione, le rappresentazioni geometriche vengono solitamente costruite con approssimazioni più o meno forti, cercando di pervenire al miglior compromesso tra accuratezza e velocità. Dal nostro modello sono stati esclusi tutti i particolari ritenuti di scarsa rilevanza per lo studio di prima approssimazione cui è stata diretta la parte iniziale del lavoro. Per tale motivo abbiamo eliminato finestrini, manopole, scabrosità ed ingressi. Importante è stata la scelta di eliminare anche ruote e rotaie. Tale scelta, se apparentemente incongruente, è stata in realtà dettata dall’esigenza di analizzare la parte superiore e laterale tralasciando, almeno per ora, tutti gli effetti che ciò potrebbe portare sulla stabilità di marcia.

Nella figura che segue viene rappresentato il primo modello costruito con una motrice di testa, una di coda e dodici carrozze.

Per diminuire al massimo i tempi di calcolo, il volume di controllo è stato costruito in forma elementare ma con dimensioni tali da poter contenere efficacemente le turbolenze laterali superiori e posteriori dovute al moto del corpo nell'aria. La geometria in esame è stata poi sottratta al suddetto volume, producendo l'effetto di ostacolo al movimento.

7.5.3 Risultati ottenuti

Lo studio di fattibilità per l'applicazione del sistema fotovoltaico su una carrozza ETR 500 ha dimostrato che possono essere installati sul tetto 20 "vassoi" per la potenza complessiva di 2380 W p. L'energia generata annualmente, calcolata secondo la UNI 10349, è pari a 2100 kWh, alla temperatura di 25 °C per la zona di Firenze supponendo il rendimento moduli FV e batterie pari al 75 %.

Il convertitore viene posizionato nel sottocassa della carrozza.

Lo studio del modello matematico, per la distribuzione delle pressioni, è avvenuto individuando un modello di dimensioni ridotte, con cui è stato possibile passare ad elaborazioni di tipo instazionario che richiedono risorse computazionali notevoli. È il caso ad esempio di incrocio con altri treni, ingresso gallerie, passaggio ponti e situazioni orografiche particolari.

I risultati di tale elaborazioni, hanno mostrato che le maggiori pressioni sono concentrate sul locomotore e sulla prima carrozza. Sono state fatte delle prime analisi sul modello alle velocità di 30, 50 e 70 metri al secondo, i cui risultati grafici sono rappresentati di seguito.

La figura 11 rappresenta le pressioni statiche, opportunamente scalate per evidenziare le zone di distacco, la figura 12, invece, le linee di corrente sempre con scala opportuna.

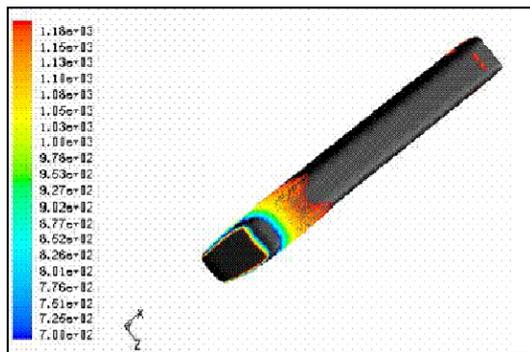



Fig. 11

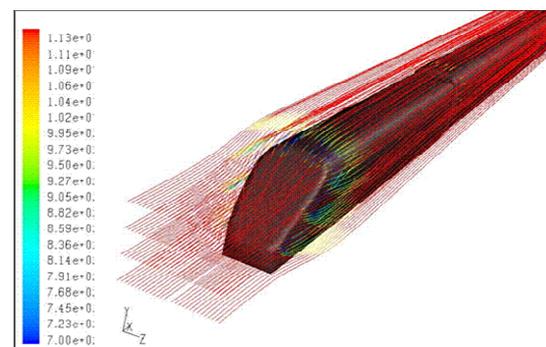



Fig. 12

Dalla figura 12 si può notare come la zona più critica si trovi sulla motrice di testa nella zona con più forte variazione di curvatura. La repentina variazione di velocità potrebbe dar vita a vibrazioni ed a fenomeni acustici anomali.

Come previsto è stato realizzato un modellino della carrozza dell'ETR500 con l'applicazione dei pannelli fotovoltaici sull'imperiale e di un locomotore E 404 sempre dell'ETR 500.

7.5.4 Commenti

L'applicazione di un sistema fotovoltaico di un treno Eurostar, mostra notevoli difficoltà nel caso di installazione di pannelli fotovoltaici pre-fabbricati (ovvero gli attuali sul mercato per applicazioni civili) a causa delle notevoli sollecitazioni aerodinamiche a cui sarebbero sottoposti, come dimostrato dalla realizzazione delle studio ("Modellazione matematica dell'aerodinamica dell'ETR500". Infatti le ripetute sollecitazioni aerodinamiche oltre a quelle meccaniche, e gli agenti corrosivi mettono a dura prova gli ancoraggi meccanici del sistema.

Pertanto risulterebbe necessario individuare una tecnologia innovativa per l'estensione dell'applicazione come per esempio la diffusione della materia attiva FV sotto forma di multistrato sulla lamiera costituente l'imperiale.

7.5.5 Difficoltà incontrate

Non si sono riscontrate difficoltà.

7.5.6 Documenti prodotti e/o allegati

Specifica tecnica dei convertitori
Studio di fattibilità ETR 500
Modello matematico-"Modellazione matematica dell'aerodinamica dell'ETR500"
Gli allegati sono già stati consegnati con il Rapporto Intermedio del 10.06.04

7.6 Task 6 - Divulgazione e gestione del progetto

DATE PREVISTE: DAL 01/11/2002 AL 31/10/2006
DATE EFFETTIVE: DAL 01/11/2002 AL 31/10/2006

7.6.1 Cosa era previsto

La Trenitalia, come previsto nel contratto, è tenuta a divulgare i risultati ottenuti nel corso della sperimentazione del sistema fotovoltaico mediante una campagna di informazione multimediale rivolta a specifici target group costituiti dai potenziali utilizzatori del sistema fotovoltaico e delle categorie interessate agli sviluppi del progetto, nonché all'UIC (Union Internationale Chemin de Fer) quale coordinatore di tutte le ferrovie europee.

L'obiettivo dell'attività è, quindi, di realizzare prodotti di divulgazione efficaci rivolti alla diffusione della tecnologia innovativa fotovoltaica individuata per l'alimentazione degli accumulatori a bordo rotabile, nel rispetto dell'ambiente.

In questa ottica è stato predisposto un piano di comunicazione che, a partire dal 1° Novembre 2002 al 31 Ottobre 2005 (compresi i 12 mesi di proroga del progetto), attraverso varie attività e diversi strumenti tradizionali e digitali, dovrà far conoscere ai segmenti di pubblico individuati, i risultati della sperimentazione e l'andamento del progetto.

L'individuazione di gruppi target che diventeranno gli interlocutori privilegiati delle diverse azioni di comunicazione sono: Ministeri Ambiente e Trasporti (Italia e resto d' Europa), Università, Istituti di Ricerca, Enti locali e referenti politici e/o dirigenti tecnici interessati alla nuova tecnologia, Ferrovie in concessione e private (Italia e resto d'Europa), Aziende municipalizzate, Opinione pubblica diffusa, Organizzazioni non governative impegnate in tematiche ambientali e dei trasporti, fornitori e produttori di componenti e sistemi.

I prodotti (deliverables) previsti dell'attività sono la realizzazione di conferenze divulgative, conferenze stampa, materiale audio-visivo e/o cartaceo, sito web, pubblicazioni (manuale operativo), brochure finale IT/EN, newsletter con aggiornamento, CD-rom riportante la presentazione del progetto, relazione tecnica finale.

In questa task è inserita la gestione del progetto con contabilità separata, una struttura di monitoraggio dell'andamento della spesa di progetto; il sistema informatico di avanzamento contabile e finanziario del progetto utilizza il modulo SAP che dà la possibilità di controllo puntuale delle spese sostenute.

7.6.2 Cosa è stato fatto

Come previsto, è stato costituito un Gruppo d'interesse formato da rappresentanti italiani ed europei di istituzioni tecniche e non interessate nei settori dei trasporti ed dell'ambiente quali UIC, Università Tor Vergata Roma (Dipartimento Ingegneria Meccanica), dell'istituto di ricerca ENEA (Responsabile Progetto Collettori Solari), CRIT (Centro Ricerche Innovazione Tecnologica) – SIPE ed è stato costituito un data-base di indirizzi (dei target group sopra citati) cui comunicare la Newsletter e l'avanzamento del Progetto con i risultati ottenuti dalle prove e misure previste.

La Newsletter informativa, in formato elettronico, è stata inserita nella pagina web del sito di Trenitalia, ed è stata successivamente aggiornata con i risultati ottenuti dalle prove e misure effettuate nel tempo, in modo da divulgare costantemente l'andamento del progetto.

Il 20 Dicembre 2002, in merito al Premio Nazionale per l'ambiente Gianfranco Merli, il Movimento Azzurro (Associazione di protezione Ambientale) ha assegnato alla società Trenitalia il premio per il progetto PVTRAIN, con una breve presentazione del progetto stesso, con la seguente motivazione "Per l'alto valore della iniziativa di installare sui treni i pannelli solari e di darne corretta ed adeguata comunicazione al pubblico, esempio di grande sensibilità alle questioni ambientali e per incentivare nel mondo della ricerca, della produzione industriale, nel grande pubblico le iniziative positive per l'ambiente".

In occasione di eventi comunicativi in ambito tecnico/ambientale (convegni, conferenze, workshop), sono stati diffusi Comunicati stampa al Servizio Nazionale Agenzie On-line a seguito della quale sono stati pubblicati articoli su quotidiani e siti internet; nel Dicembre 2002 è stato realizzato, e mandato in onda, uno SPOT sul programma "2000", sulla Rete4, in occasione di un servizio giornalistico sullo "Lo Stato del Pianeta".

Con l'evento del "Treno Verde" 2003 (un treno che effettua un itinerario in Italia con sosta nelle principali stazioni italiane per la divulgazione delle iniziative per l'ambiente) è stato allestito, all'interno della carrozza *treno verde* prototipo del progetto (quindi con i pannelli fotovoltaici installati sul tetto), uno spazio divulgativo del progetto PVTRAIN con l'esposizione del modellino ETR500 realizzato nell'ambito della Task 5 e un pannello con la descrizione del progetto.

In occasione della Conferenza sulla Mobilità avvenuta a Milano dal 20-22 Gennaio 2003, è stata inserita la presentazione del Progetto sul sito www.mobilityconference.it attivo per una anno a partire da Gennaio 2003.

Nell'ambito del Convegno "Ricerca e Sviluppo nei Sistemi Ferroviari", organizzato dal CIFI (Collegio Ingegneri Ferroviari Italiani) nel mese di Maggio 2004, è stato allestito uno spazio divulgativo del progetto PVTRAIN nello stand dedicato al Gruppo FS con diffusione della brochure divulgativa, è stato presentato il progetto nell'ambito della conferenza sulle tecnologie innovative ed è stato inserito un articolo agli atti del convegno.

Per dare visibilità al progetto all'interno dell'azienda sono state realizzate etichette divulgative posizionate esternamente agli uffici in cui si svolgevano le attività relative al progetto, e, per dare visibilità del progetto all'esterno, sono stati allestiti pannelli divulgativi sugli ingressi delle officine in cui è avvenuta la realizzazione dei prototipi (Firenze Porta a Prato, Foggia, Verona).

Altra occasione di divulgazione del progetto è stata la partecipazione, con distribuzione di Brochure, alla Fiera Internazionale della Scienza a Genova.

Il 28 Novembre 2003 è stato realizzato, come previsto nel piano divulgativo, il Convegno "Il settore fotovoltaico e le applicazioni ferroviarie" a Milano presso il Politecnico di Milano, nell'ambito del quale è stata dedicata la mattinata per la presentazione del progetto nel suo aspetto tecnico costruttivo, nonché di riflessione nel settore ambientale.

Dall'1 al 12 Dicembre 2003 a Milano si è tenuta la nona Conferenza delle Parti - COP9, ovvero il vertice mondiale sul clima durante il quale i Governi si confrontano sulle politiche da perseguire, le

strategie da adottare e gli accordi da sottoscrivere per ridurre l'impatto ambientale delle proprie azioni, nel rispetto della Convenzione Quadro delle Nazioni Unite sui Cambiamenti Climatici, in occasione della quale è avvenuta la distribuzione della brochure PVTRAIN in lingua inglese per poter divulgare in ambito europeo, e non, il progetto innovativo.

Anche nell'anno 2004 è stato composto il Treno Verde sempre con una carrozza prototipo PVTRAIN, che ha circolato su rete ferroviaria nazionale seguendo un itinerario preciso che tocca le principali città italiane, mostrando così l'applicazione del progetto. In tale manifestazione, oltre al pannello esplicativo del progetto ed alla presenza del modellino ETR500 realizzato nella Task 5, a bordo della carrozza prototipo è stato allestito un computer con installato un software dimostrativo del funzionamento dell'impianto fotovoltaico.

Il 4-5 Febbraio 2004 a Parigi, presso la sede principale dell'UIC, si è svolta la Conferenza sull'Efficienza Energetica (2nd UIC Railway Energy Efficiency Conference), nell'ambito della quale è stata fatta la presentazione del progetto PVTRAIN, con relativo allestimento di uno spazio dedicato al progetto e distribuzione della brochure.

L' 8 Giugno 2004 è stato organizzato dal CIFI il "Convegno PVTRAIN – Photovoltaic Train" con conferenza stampa presso la stazione centrale dove sono stati portati 3 mezzi prototipi composti (un locomotore E636, una carrozza del treno verde e un carro merci) a seguito della quale sono stati pubblicati articoli su quotidiani locali.

Il 27 Ottobre 2004 è stata organizzata a Parigi, presso la sede dell'UIC, la Conferenza internazionale PVTRAIN, come previsto nel piano divulgativo. In tale occasione è stato fatto l'aggiornamento della brochure, in lingua italiana e inglese, e l'aggiornamento della Newsletter con la pubblicazione, in forma scaricabile, delle presentazioni effettuate durante la Conferenza.

La possibilità di divulgare ulteriormente il progetto, è avvenuta anche in occasione dell'allestimento del Treno Verde 2005 con una carrozza PVTRAIN, che ha circolato su rete ferroviaria nazionale.

Una tappa effettuata dal Treno Verde 2005, è stata presso la stazione di Pisa; in tale occasione è avvenuta, il 12 Febbraio 2005, all'interno della carrozza del treno verde, la Conferenza sul tema della "Risorse energetiche ed il rinnovo delle fonti", organizzata dall'Assessorato all'Ambiente di Pisa, nell'ambito della quale è stato presentato il progetto PVTRAIN.

La pubblicazione di articoli è avvenuta su riviste tecniche quali "L'Amministrazione Ferroviaria", "La tecnica professionale", "Fermerci" e sul magazine europeo "The Parliament" mese di Ottobre 2005.

In occasione della chiusura del progetto, è stata organizzata la Conferenza finale del Progetto PVTRAIN. Il Convegno Finale, dal titolo "Trenitalia e la sostenibilità nei trasporti, una realtà chiara come il sole – PVTRAIN: il 1° treno europeo che utilizza l'energia solare" è avvenuto 20 Ottobre 2005 a Roma presso la Cappa Mazzoniana - Stazione Termini, alla presenza del Ministro dell'Ambiente e della Tutela del Territorio On. Altero Matteoli e dell'Amministratore Delegato di Trenitalia Ing. Roberto Testore. In tale Conferenza è stato presentato il progetto negli aspetti tecnici e di risvolto ambientale, nonché nei risultati ottenuti e nel potenziale utilizzo della tecnologia progettata e sperimentata. In tale occasione si è provveduto alla realizzazione e distribuzione, a tutti i partecipanti, del "Manuale Tecnico Metodologico" nonché alla consegna di gadget rappresentativi del progetto. La partecipazione al Convegno è stata ampia, con circa 180 partecipanti e 30 rappresentanti della stampa, a seguito della quale ci sono stati pubblicazioni di articoli su quotidiani nazionali e locali, nonché un servizio televisivo su RAI2 e servizio radiofonico su RADIORAI1.

La comunicazione del progetto prosegue anche oltre il termine della conclusione del progetto stesso (31 Ottobre 2005); infatti, a seguito della ampia divulgazione effettuata nel corso dei 3 anni di sperimentazione, è stata richiesta la partecipazione al Convegno "I nuovi incentivi per il Fotovoltaico:Funzionamento, Applicazioni e Valutazione degli investimenti" organizzato da LRA (Learning Resources Associates) il 16 Dicembre 2005.

Altro evento di rilievo è la partecipazione con successiva assegnazione della Menzione Speciale del premio "Impresa e Ambiente" promosso da Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio, Ministero delle Attività Produttive, Unicamere e Camera di Commercio di Roma (consegna del premio è avvenuta a Roma il 13 Febbraio 2006 alla presenza del rappresentante del Ministro dell'Ambiente e della Tutela del Territorio On. Altero Matteoli e del rappresentante del Ministro delle Attività Produttive On. Claudio Scajola). Sul sito http://www.premioimpresambiente.it/ è disponibile la lista dei partecipanti, dei premiati e foto dell'evento della premiazione.

Nel mese di Giungo 2006 (16-18 Giugno) in occasione del 3° forum dell'informazione cattolica per la salvaguardia del creato dal titolo "Energia rinnovabile: un scelta etica" organizzato dalla Greenaccord a Firenze, è stato richiesto l'intervento di Trenitalia per la presentazione del progetto PVTRAIN e la presenza, presso la Stazione ferroviaria S.M.Novella dei prototipi realizzati. In tale occasione si provvederà alla distribuzione dei "Manuale Tecnico Metodologico".

7.6.3 Risultati ottenuti

Il piano di divulgazione, avente l' obiettivo di diffondere la tecnologia fotovoltaica individuata per l'alimentazione degli accumulatori a bordo rotabile nel rispetto dell'ambiente, ha realizzato prodotti di divulgazione efficaci che hanno dato ampia visibilità al progetto sul piano nazionale ed europeo.

L'efficacia del programma di divulgazione e dei sistemi adottati per realizzarlo, è stata riscontrata nella partecipazione ai convegni e seminari organizzati nonché negli articoli scritti sui quotidiani nazionali e locali. Inoltre, l'interesse è riscontrato anche nelle richieste di partecipazioni ad eventi, successive alla fine del Progetto quali (già citati) il Convegno "I nuovi incentivi per il Fotovoltaico:Funzionamento, Applicazioni e Valutazione degli investimenti", partecipazione al premio "Impresa e Ambiente", il prossimo Forum organizzato dalla Greenaccord a Firenze.

7.6.4 Commenti

La divulgazione del progetto è stata eseguita come da programma, sfruttando, inoltre, ogni occasione disponibile per la comunicazione della nuova tecnologia studiata e realizzata nell'ambito del Programma LIFE-Ambiente.

7.6.5 Difficoltà incontrate

Non si sono riscontrate difficoltà

7.6.6 Documenti prodotti e/o allegati

Allegato 1 – Elenco Target Group
Allegato 2 – Elenco Gruppo d'interesse
Allegato 3 – Newsletter in formato elettronico e aggiornamento trimestrale visibile sul sito www.trenitalia.com disponibile dal 30 aprile 2003
Allegato 4 – Fascicolo di Comunicati Stampa inviati alle Agenzie On-line
Allegato 5 - Filmato dello Spot in formato elettronico
Allegato 6 – Itinerario Treno Verde 2003
Allegato 7 – Fotografie del Treno Verde e della Conferenza
Allegato 8 – Immagine web del sito mobilityconference.it
Allegato 9 – Premio Nazionale per l'Ambiente
Allegato 10 – Articolo per il Convegno CIFI
Allegato 11 – Fotografie dei pannelli esposti nelle Officine di Foligno e Firenze

Allegato 12 – Articolo pubblicato sulla rivista “TuttoTreno” n°162 di Marzo
Allegato 13 – Brochure in lingua italiana/inglese
Allegato 14 – Brochure di invito al Convegno e filmato
Allegato 15 – Filmato del Convegno “Il settore fotovoltaico e le applicazioni ferroviarie” a Milano
Allegato 16 – Filmato della carrozza bagagliaio presentato al Convegno “Il settore fotovoltaico e le applicazioni ferroviarie” a Milano
Allegato 17 - Itinerario del Treno Verde 2004
Allegato 18 – Fotografie del Treno Verde 2004
Allegato 19 – Cd con software installato sul Treno Verde
Allegato 20 – Filmato della 2nd UIC Railway Energy Efficiency Conference a Parigi
Allegato 21 – Articolo sul Treno Verde sulla rivista “Riflessi” distribuita sul Treno Eurostar
Allegato 22 – Presentazioni conferenza di Parigi il 27 Ottobre 2004 (in formato elettronico)
Allegato 23 – Brochure aggiornata
Allegato 25 – Itinerario del Treno Verde 2005

Gli allegati sopra citati sono già stati consegnati nel Rapporto Intermedio del 29.02.04

Allegato 26 – Articolo pubblicato su “L’Amministrazione Ferroviaria”
Allegato 27 – Articolo pubblicato su “The Parliament”
Allegato 28 – Articolo pubblicato su “Fermerci”
Allegato 29 – Manuale Tecnico Metodologico in lingua italiana e in lingua inglese
Allegato 30 – Programma del convegno, presentazioni degli interventi dei relatori, rassegna stampa ed elenco partecipanti (circa 200 persone compresa la stampa)
Allegato 31 – Articoli relativi al convegno pubblicati sulla stampa e servizi televisivi

Gli allegati sopra citati sono già stati consegnati nel Rapporto Finale del 31.01.06

8. ATTIVITA' DI DISSEMINAZIONE E PRODOTTI DEL PROGETTO

Il piano di comunicazione del progetto, in termini di attività svolte e di risultati ottenuti, è stato già ampiamente illustrato nella Task 6 (punto 7.6), prevista proprio in relazione alla disseminazione del progetto, a suo tempo pianificata come specifica attività.

9. VALUTAZIONE E CONCLUSIONI

La Direzione Ingegneria Sicurezza e Qualità di Sistema, ex-UTMR (Unità Tecnologie Materiale Rotabile), dedicata all'ingegneria e alla tecnologia del treno, ha guardato con interesse al fotovoltaico con la sperimentazione diretta, per verificarne le possibilità di applicazione in ambito ferroviario, sviluppando il progetto PVTRAIN.

L'obiettivo è quello di analizzare e sperimentare l'applicazione, sui treni, della tecnologia fotovoltaica, una delle più avanzate e mature tra le tecnologie che sfruttano le fonti rinnovabili, che permette di risolvere efficacemente il problema del risparmio energetico nel rispetto dell'ambiente.

Il progetto, di durata 3 anni, ha visto l'installazione di pannelli fotovoltaici sulle superfici curve di 10 mezzi ferroviari individuati (5 carrozze, 3 carri merci e 2 locomotori) per il mantenimento in carica delle batterie a bordo dei treni (per l'alimentazione dei servizi ausiliari) durante la marcia (in alternativa all'alimentazione tradizionale dalla linea di contatto) e, soprattutto, durante le soste.

Data la specificità della sperimentazione, è stato effettuato un benchmarking sui pannelli fotovoltaici disponibili sul mercato, con le caratteristiche specifiche necessarie alle esigenze applicative del progetto ovvero flessibilità (le superfici delle carrozze sono curve) e alta efficienza di captazione della luce diffusa (i mezzi si muovo sul territorio nazionale alternando luce ed ombra). La ricerca di mercato ha evidenziato le tipologie di pannelli fotovoltaici a seconda dei diversi processi utilizzati per la loro produzione: celle monocristalline, celle poli/multi cristalline e celle al silicio amorfo. Nel confronto con gli altri due tipi, le celle amorfe hanno il rendimento più basso ma anche caratteristiche di versatilità e adattabilità maggiori soprattutto nei casi di irraggiamento diffuso (cielo coperto, ecc.); pertanto sono state individuate come più idonee per l'applicazione sui treni.

Per i prototipi carrozze è stato scelto il modulo a "Tegola fotovoltaica" con il sistema a tripla giunzione che presenta una disposizione di tre strati di lega di silicio su un supporto di acciaio flessibile molto sottile.

Le caratteristiche prestazionali del modulo fotovoltaico (costituito da strisce flessibili di tegole fotovoltaiche già cablate) e la necessità di ottenere un quantitativo di potenza di picco e tensione nominale idonea alle necessità applicative della carrozza, hanno condotto alla progettazione/realizzazione di un modulo fotovoltaico *ad hoc*: il "vassoio" (già descritto nel punto "6. Tecnico").

Individuato lo spazio disponibile sul tetto delle carrozze, si è proseguito con la progettazione del sistema fotovoltaico, nonché della realizzazione dei prototipi carrozze e le successive prove/misure.

La differente disponibilità di spazio e di tipologia di superficie dei carri merci, locomotore diesel e del locomotore elettrico (superficie piatta) ha visto la scelta di un altro modello di pannello fotovoltaico, US 116, sempre al silicio amorfo ma diverse dimensioni e con cornice in alluminio che lo rende, quindi, semi-rigido. In tal caso, infatti, essendo la superficie dei mezzi orizzontale, la necessità della flessibilità dei pannelli veniva meno; pertanto è stata fatta la scelta di un modulo completo precostituito piuttosto che di un modulo da *customizzare* come nel caso della tegola in vassoio.

Sono stati, quindi, realizzati i prototipi carri merci, locomotiva elettrica e automotrice diesel ed effettuate le prove e misure.

L’applicazione elettrica, per tutti i prototipi (carrozze, locomotori diesel ed elettrico e carri merci), ha comportato lo studio di interfacciamento tra i circuiti esistenti a bordo treno ed il convertitore appositamente progettato per tale applicazione.

Tale convertitore, oltre a garantire la separazione galvanica tra i pannelli FV e il circuito di batteria (in caso di contatti accidentali vari, ad esempio, la rottura del filo sagomato della linea a 3kV e la conseguente caduta del cavo sui pannelli), trasforma l’energia prodotta dai pannelli in corrente continua alla tensione di circa 29 V per ricarica delle batterie delle carrozze e 12 V per i carri, seguendo le condizioni estremamente variabili prodotte dal movimento del mezzo come variazione della potenza generata dovuta alla variazione della luce incidente: basti pensare al rotabile in movimento che passa velocemente da zone di ombra a zone di piena illuminazione solare.

Per verificare la validità del sistema sperimentale, sono state effettuate prove sui componenti e sul sistema completo: modulo a Tegola fotovoltaica (resistenza a sollecitazione aerodinamica-prova in galleria nel vento), convertitori (prove funzionali e prove di isolamento), veicolo fermo (prove elettriche per valutare le performance del sistema in termini di efficienza dei singoli apparati, con particolare riferimento alla capacità del sistema convertitore di ricercare il punto di erogazione della massima potenza), veicolo in movimento (prove di colpo di pressione-incrocio con altri treni, ingresso ed uscita dalle gallerie e prove elettriche).

I sistemi utilizzati per le misurazioni elettriche sono di due tipi: il sistema *field point* ed il sistema *real time*.

I risultati ottenuti dal sistema di misura indicano che la tecnologia applicata è idonea agli scopi prefissati sia in termini energetici che in termini di sicurezza.

In modo particolare l’applicazione sui carri merci si sta dimostrando di rilevante interesse, considerando che in origine il carro non risulta alimentato. L’energia prodotta, infatti, è sufficiente per alimentare il sistema di elettroserrature sperimentato per la protezione di merci di valore nonché di sistemi di posizionamento dei mezzi in movimento su tutto il territorio nazionale ed internazionale (GPS), integrati con un sistema di controllo per le merci pericolose.

I dati forniti dal sistema di misurazione “real time”, hanno evidenziato gli scostamenti dell’energia prodotta rispetto alle previsioni di produzione di energia provenienti dalle potenzialità teoriche dei pannelli fotovoltaici.

Le motivazioni che portano a tali differenze sono legate alla applicazione del tutto innovativa, e non standard, dei pannelli fotovoltaici.

I pannelli fotovoltaici applicati sulle ***carrozze***, hanno riportato, dalle misurazioni effettuate dal Luglio 2003 a Settembre 2005, una riduzione di energia elettrica agli accumulatori, del 5 % rispetto all’energia teorica attesa. Tale scostamento nasce, prima di tutto, dall’installazione in posizione orizzontale, per ovvie necessità applicative, dei pannelli sui tetti del mezzo (e non quindi con la corretta inclinazione suggerita dalle norme applicative dei pannelli FV sulle superfici a seconda della posizione -latitudine- sul territorio nazionale) con conseguente minore rendimento energetico dei pannelli stessi. Inoltre il sistema fotovoltaico collegato elettricamente al convertitore che presenta un suo rendimento elettrico, riduce ulteriormente l’energia fornita agli accumulatori, di un fattore pari al rendimento del convertitore stesso.

Infine il reale flusso di energia, fornito dai pannelli ed assorbito dagli accumulatori, dipende anche dall’effettivo stato di carica degli accumulatori stessi che assorbono il massimo dell’energia se scarichi.

I risultati provenienti dalla campagna misure su ***Locomotore E 636*** e sull’***Automotrice diesel Aln 668***, mostrano una riduzione del 70 % dovuto in questo caso, oltre alla motivazione del convertitore (convertitore *customizzato* per le carrozze e utilizzato, per una questione di economia, anche per i carri merci che presentano un fabbisogno energetico inferiore) anche alla disposizione dei pannelli fotovoltaici ed al loro collegamento in serie. Infatti, essendo tali pannelli posizionati sia sul piano

orizzontale che sul piano inclinato per ridotta disponibilità di spazio dovuta alla presenza di altri componenti, si verifica una riduzione di efficienza causata dai pannelli che captano meno luce. Il sistema fotovoltaico costituito da un sistema di serie/parallelo, per le proprie intrinseche caratteristiche, comporta una limitazione dell'energia complessiva captata; ciò è dovuto ai pannelli posti in ombra che, per il gioco serie/parallelo, penalizzano anche quelli che raccolgono la massima energia luminosa.

I risultati ottenuti dalle misure sui ***carri merci***, evidenziano una energia prodotta dai pannelli fotovoltaici inferiore di circa il 50 % rispetto all'energia teorica nominale. La motivazione di tale risultato risiede prima di tutto nell'utilizzo di pannelli fotovoltaici diverso dallo standard sia in termini applicativi (corretta inclinazione in funzione della localizzazione del mezzo) che di esposizione alla luce solare (per esigenze di servizio i carri sono stati ricoverati nelle officine e quindi al coperto), nonché nell'utilizzo di un convertitore *customizzato* per le carrozze e utilizzato, per una questione di economia, anche per i carri merci che presentano un fabbisogno energetico inferiore. L'energia ottenuta dal sistema fotovoltaico è, comunque, sufficiente per l'utilizzo ipotizzato (alimentazione di elettroserrature e di sistemi di controllo delle merci pericolose).

In conclusione la sperimentazione innovativa dell'applicazione della tecnologia fotovoltaica a bordo dei mezzi ferroviari, ha evidenziato dei risultati positivi.

La tecnologia individuata, risulterebbe riproducibile per altri operatori ferroviari, tenendo però in considerazione che esistono dei fattori limitanti quali:

- i pannelli fotovoltaici attualmente sul mercato hanno una destinazione d'uso di impianti fissi, pertanto la loro adattabilità su mezzi in movimento ad alta velocità risulta una forzatura con annesse problematiche di efficienza energetica (il loro posizionamento è in funzione della disponibilità sulla superficie e non in funzione dell'*optimum* di captazione solare) nonché di sicurezza essendo essi soggetti a notevoli sollecitazioni aerodinamiche/ meccaniche e ad agenti corrosivi che mettono a dura prova gli ancoraggi meccanici;
- la durata di vita dei pannelli fotovoltaici è stimata, dai costruttori, a 20 anni, ma ad oggi non si è ancora avuta conferma di tale dato non essendoci storicità di impianti fotovoltaici di tale durata, o meglio, gli impianti in vita da quasi 20 anni hanno una tecnologia obsoleta rispetto agli attuali pertanto i risultati ottenuti potrebbero essere non del tutto soddisfacenti.

Pertanto una ipotetica soluzione per l'utilizzo di pannelli fotovoltaici su mezzi in ambito ferroviario, sarebbe la realizzazione di una produzione industriale della tecnologia innovativa, per il nuovo materiale rotabile, della diffusione della materia prima attiva fotovoltaica (il silicio) sotto forma di multistrato sulla lamiera costituente l'imperiale dei mezzi ferroviari. Tale soluzione comporterebbe anche la creazione di nuovi posti di lavoro, ma essendo un progetto di notevole rilevanza economica, risulterebbe indispensabile essere certi della durata di vita degli elementi fotovoltaici, ad oggi, come detto, non dimostrabile.

La futura applicabilità su larga scala della tecnologia fotovoltaica sviluppata nell'ambito del progetto vede come condizione necessaria, sebbene non sufficiente, l'estensione del decreto del 28 Luglio 2005 del Ministero delle Attività Produttive all'ambiente ferroviario. Tale decreto vede l'incentivazione della produzione di energia elettrica, mediante conversione fotovoltaica, della fonte solare con i Certificati Verdi agli impianti fotovoltaici civili (e quindi fissi) e non ancora esteso ai mezzi in movimento come appunto il progetto PVTRAIN.

In modo particolare l'applicazione sui carri merci si sta dimostrando di rilevante interesse, considerando che in origine il carro non risulta alimentato dalla linea di alimentazione. L'energia prodotta, infatti, è sufficiente per alimentare il sistema di elettroserrature sperimentato per la protezione di merci di valore nonché di sistemi di posizionamento dei mezzi in movimento su tutto il territorio nazionale ed internazionale (GPS), integrati con un sistema di controllo per le merci pericolose.

Nell’ambito aziendale è stato sviluppato nel dettaglio il business, per i carri merci, legato alla protezione delle merci di valore quali i tabacchi.

Con il fine di rendere più sicuro il trasporto di merci si vuole dotare i carri merci, del trasporto tabacchi, di “elettroserrature” che danno la possibilità di apertura del carro stesso con comando a distanza (via GPRS/GSMR). L’aumento della sicurezza del trasporto dovrebbe, in termini economici, far scaturire i seguenti risultati:

- riduzione della polizza assicurativa sulla base di una comprovata riduzione del rischio;
- la possibilità di chiedere al cliente una tariffa maggiorata per il trasporto tenendo conto che il rimborso della polizza in caso di furto è comunque inferiore alla perdita dovuta alla mancata vendita del bene da parte del cliente (rapporto valore merce rimborsata/ merce rubata 1 a 10).

La Divisione Logistica, nell’anno 2003, ha contato circa 12.000 trasporti di cui il 50 % dall’estero I carri più performanti sono quelli di tipo H32, gli stessi utilizzati per la sperimentazione fotovoltaica, che potrebbero essere attrezzati con le elettroserrature. Attualmente le elettroserrature sono installate su 20 carri di cui 3 utilizzati per il progetto PVTRAIN, ma l’ipotesi è quella di montare le elettroserrature sui tutti i 200 carri H 32.

La valutazione economico/finanziaria relativa alla convenienza economica dell’applicazione dei pannelli fotovoltaici sui carri attrezzati con elettroserrature, piuttosto che con alimentazione con batterie non ricaricabili e quindi da sostituire, è stata realizzata sul trasporto della protezione delle merci di valore sopra descritte.

L’analisi economico finanziaria, quindi, è stata realizzata ponendo a confronto i due seguenti scenari:

<u>*Scenario 1*</u>

alimentazione degli apparati di comunicazione ed elettroserraturre con accumulatori ricaricati mediante Pannelli Fotovoltaici installati sul tetto dei carri merci;

<u>*Scenario 2*</u>

alimentazione degli apparati di comunicazione ed elettroserraturre con accumulatori (non ricaricabili) con gestione del ciclo di sostituzione/ricarica in parte terzializzato

Si riportano gli Economics dello studio per i due scenari.

<u>*Scenario 1*</u>

Il costo di attrezzaggio per carro merci (CAPEX) è di seguito riportato nel dettaglio:

- costo pannelli solari (2 pannelli da 60 W ciascuno): 460 €/Carro
- convertitore, manodopera, cablaggio esternalizzata 2.500 €/Carro
- costo batterie ricaricabili 80 €/carro

Quindi il CAPEX complessivo per carro con installazione di pannelli fotovoltaici e batterie ricaricabili 3.040 €/Carro

Il costo operativo (OPEX) è di seguito riportato nel dettaglio:

- ipotesi di costo di manutenzione dei pannelli solari a carro 4% (del CAPEX relativo ai panelli solari: € 2.960)
- costo di manutenzione del sistema solare a carro 118 €/carro

Quindi l’ OPEX complessivo per singolo carro è di 118 €/Carro

<u>*Scenario 2*</u>

In tale scenario, dovendo valutare la sostituzione delle batterie e quindi i costi di gestione del ciclo di sostituzione/ricarica in parte terzializzato si ha:

- *costi esterni* (costo della società terza in termini di costi del personale e mark up)

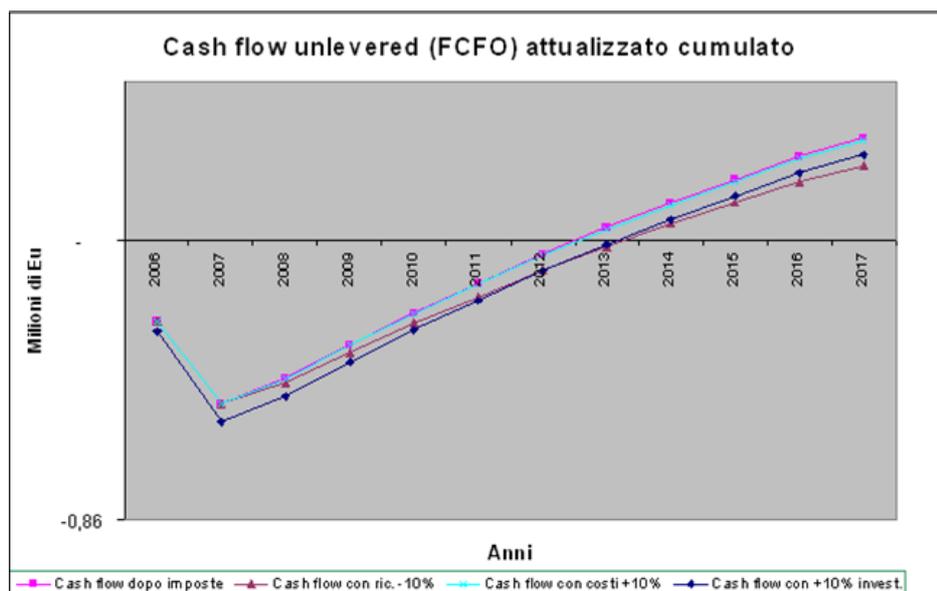
138.000 €/anno

- *costi interni*

  gestione magazzino 6.000 €/anno

  personale interno 70.000 €/anno

quindi il *costo totale è di 214.000 €/anno e considerando 100 treni all'anno con 30 carri merci a treno si ha che il costo a ricarica delle batterie stimato è di 71 €.*

Quindi l'analisi differenziale dei due scenari (*Scenario 1- Scenario 2*) realizzata su un orizzonte temporale di 12 anni, ipotizzando di attrezzare la flotta costituita dai 200 carri H32 entro l'anno 2007, ha fornito i seguenti valori economico/finanziari:

Tale risultato dimostra come sia conveniente alimentare elettroserrature ed apparati di comunicazione mediante accumulatori ricaricabili alimentati da pannelli fotovoltaici rispetto agli accumulatori non ricaricabili e quindi da sostituire (tenendo anche conto le eventuali difficoltà gestionali a cui si andrebbe incontro in tal caso).

L'evoluzione quindi del sistema fotovoltaico sui carri merci risulta d'interesse sebbene resta subordinato a decisioni appartenenti sia alla sfera della politica del Gruppo Fs che alla prassi amministrativa in uso. Infatti ogni step del procedimento necessita sempre di apposita delibera autorizzativa e la decisione finale a procedere compete ai Comitati d'Investimenti di Trenitalia e del Gruppo FS.

Il tema delle carrozze passeggeri passa per un'analisi di sostenibilità economica che possa garantire a regime le economie gestionali legate alla riduzione del numero delle attuali Officine di Ricarica Accumulatori (OCA), nonché per lo studio di un convertitore *customizzato*, adibito all'alimentazione dei servizi ausiliari, in grado di prelevare l'energia sia da campo FV che dall'alimentazione a 3 kV ottimizzando il prelievo, per quanto possibile, dal sistema FV. Altro fattore da evidenziare è la perdita economica che deriva dalla mancata efficienza di carica degli accumulatori di una carrozza già in composizione treno; in tal caso la necessaria sostituzione della carrozza stessa, comporta notevoli ritardi che si riflettono sul traffico ferroviario e quindi perdita in termini economici.

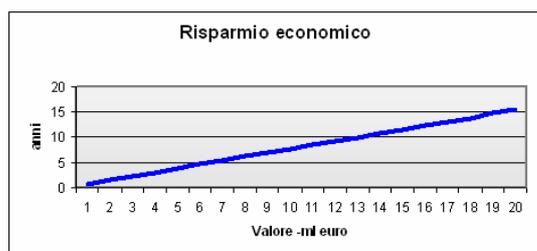
I risultati relativi all'automotrice diesel mostrano che il sistema fotovoltaico è sufficiente per il mantenimento in carica degli accumulatori a bordo necessari per l'alimentazione del sistema di avviamento del motore diesel stesso. Mentre per i locomotori elettrici, attesa la poca disponibilità di

spazio per i pannelli, i risultati ottenuti non sembrano incoraggiare l'estensione del progetto su scala industriale.

La stima dei benefici ambientali della sperimentazione nel caso di applicazione su larga scala (stimando la vita dell'impianto fotovoltaico di circa 20 anni), in base alle misurazioni effettuate nell'arco di due anni, in termini di riduzione delle emissioni di gas serra in atmosfera si valuta come segue:

- l'estensione a circa 8.600 carrozze, 77.500 tonnellate di CO2 non immesse in atmosfera
- l'estensione a circa 700 locomotori diesel, 3.000 tonnellate di CO2 non immesse in atmosfera
- l'estensione a circa 200 carri merci, 207 tonnellate di CO2 non immesse in atmosfera

I benefici economici della sperimentazione in termini di riduzione della spesa per accumulatori per la tipologia di mezzi carrozze, si valuta come segue:

- Il parco carrozze di Trenitalia è costituito da circa 8600 carrozze.
- Sono installati 6 accumulatori per carrozza con esclusione di alcune tipologie su cui ne sono installati 4. Di conseguenza il numero totale degli accumulatori utilizzati sull'intero parco è circa 48.000.
- Con l'adozione del sistema FV la vita degli accumulatori viene aumentata da 48 mesi a 56 (aumento del 20 % della vita).
- Il numero totale degli accumulatori consumati in 20 anni senza l'adozione del sistema FV è circa 240.000.
- Con l'adozione del sistema FV in numero degli accumulatori consumati in 20 anni si riduce a 192.000.
- Il risparmio, in 20 anni, corrisponde a 48.000 (= 240.000 – 192.000) accumulatori utilizzando il sistema FV.
- Costo del singolo accumulatore: 315 + 2,5% (sovrapprezzo COBAT) = 322,875 €
- 48.000 x 322,75 = 15.498.000 € risparmio sull'acquisto degli accumulatori in turn over utilizzando il sistema FV, in 20 anni.
- Nel grafico è indicato l'andamento del risparmio economico [1].

[1] *Nei benefici economici non è stato considerato il risparmio dovuto alla minor utilizzazione impiantistica e attrezzature delle OCA (Officine Carica Accumulatori) e personale addetto.*

Nel futuro la continuazione del progetto si riflette nella valutazione reale di creare un pannello fotovoltaico integrato nel tetto delle carrozze.

10. ALLEGATI

Gli allegati sono stati consegnati, come indicato nelle singole Task di progetto, con i precedenti Rapporti Semestrale, Intermedio e Finale (del 31.01.06).